

# Risultati recenti dell'esperimento Borexino: spettroscopia di neutrini solari dalla catena pp

IFAE 2018 - Milano

**Davide Basilico**

UniMi e INFN Milano



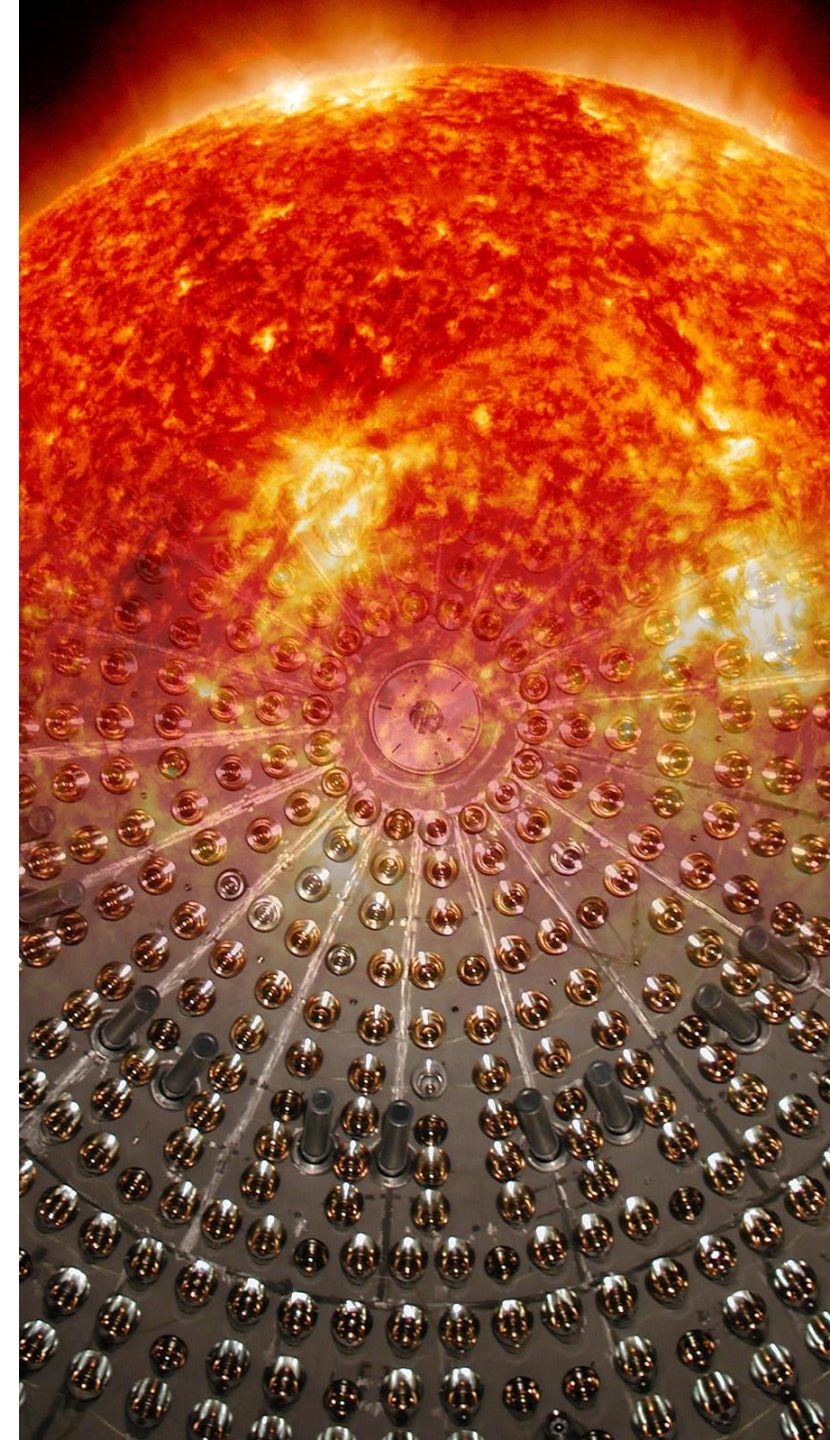
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI  
DI MILANO



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

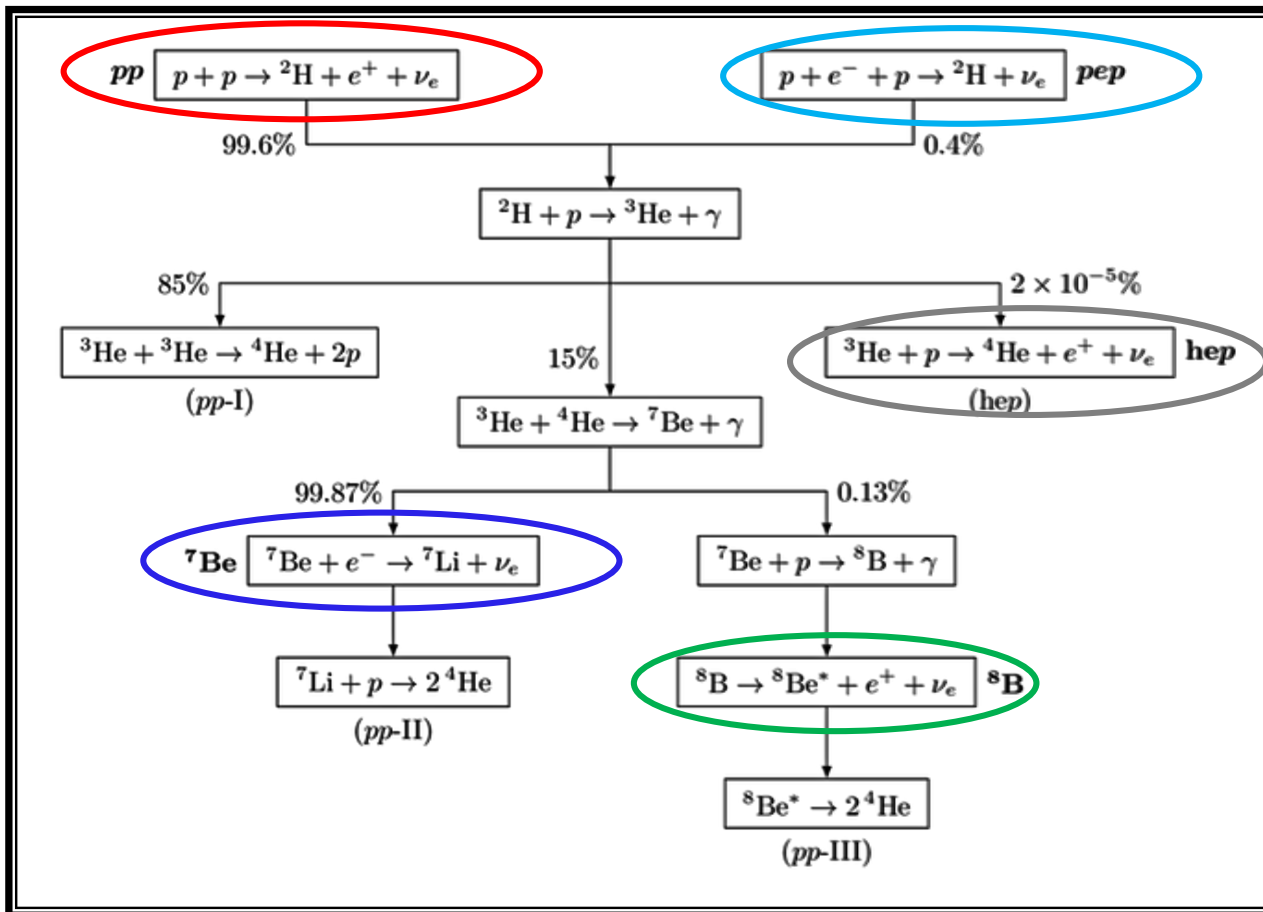
# Schema della presentazione

1. I neutrini solari
2. Borexino
3. Risultati recenti e implicazioni



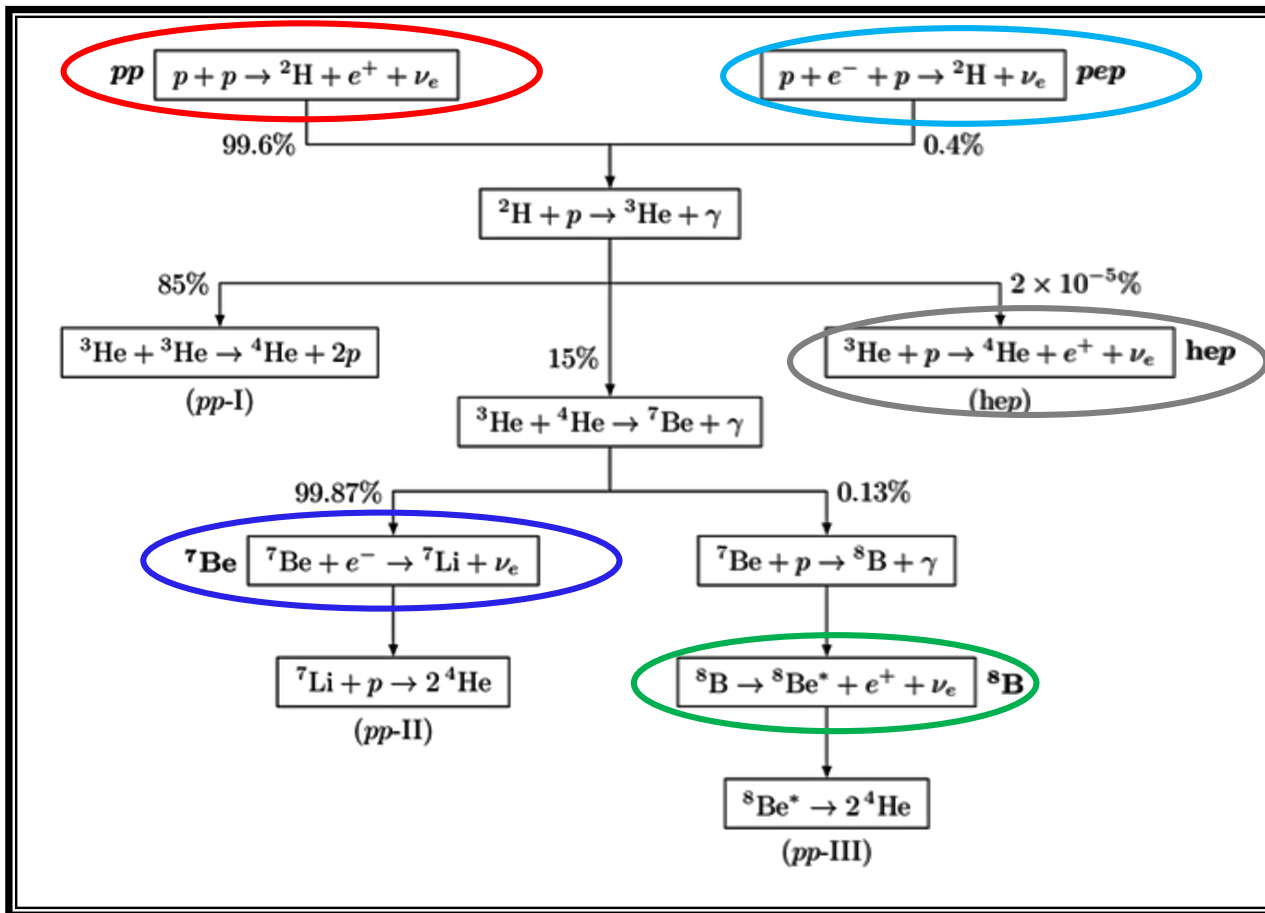
# Neutrini solari

- Reazioni di fusione nucleare → emissione di neutrini
- “Fotografia” dell’interno del Sole
- Catena pp: dominante nel Sole (99%)

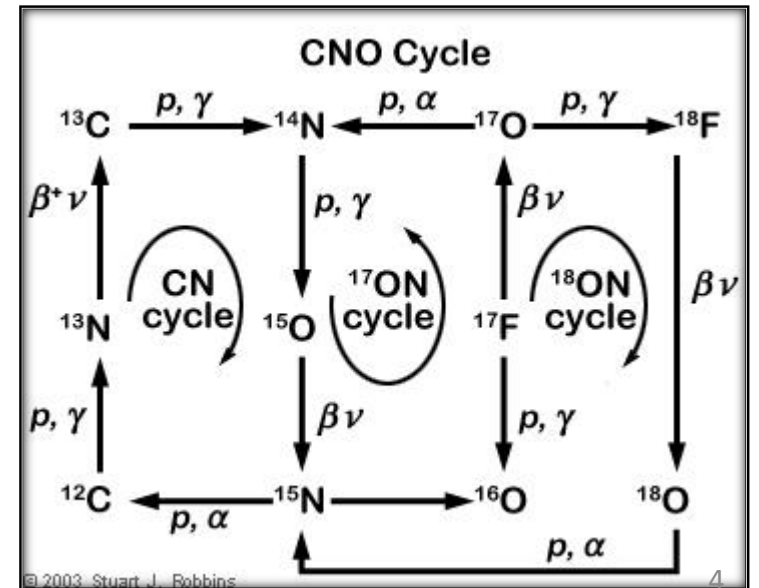


# Neutrini solari

- Reazioni di fusione nucleare → emissione di neutrini
- “Fotografia” dell’interno del Sole
- Catena pp: dominante nel Sole (99%)

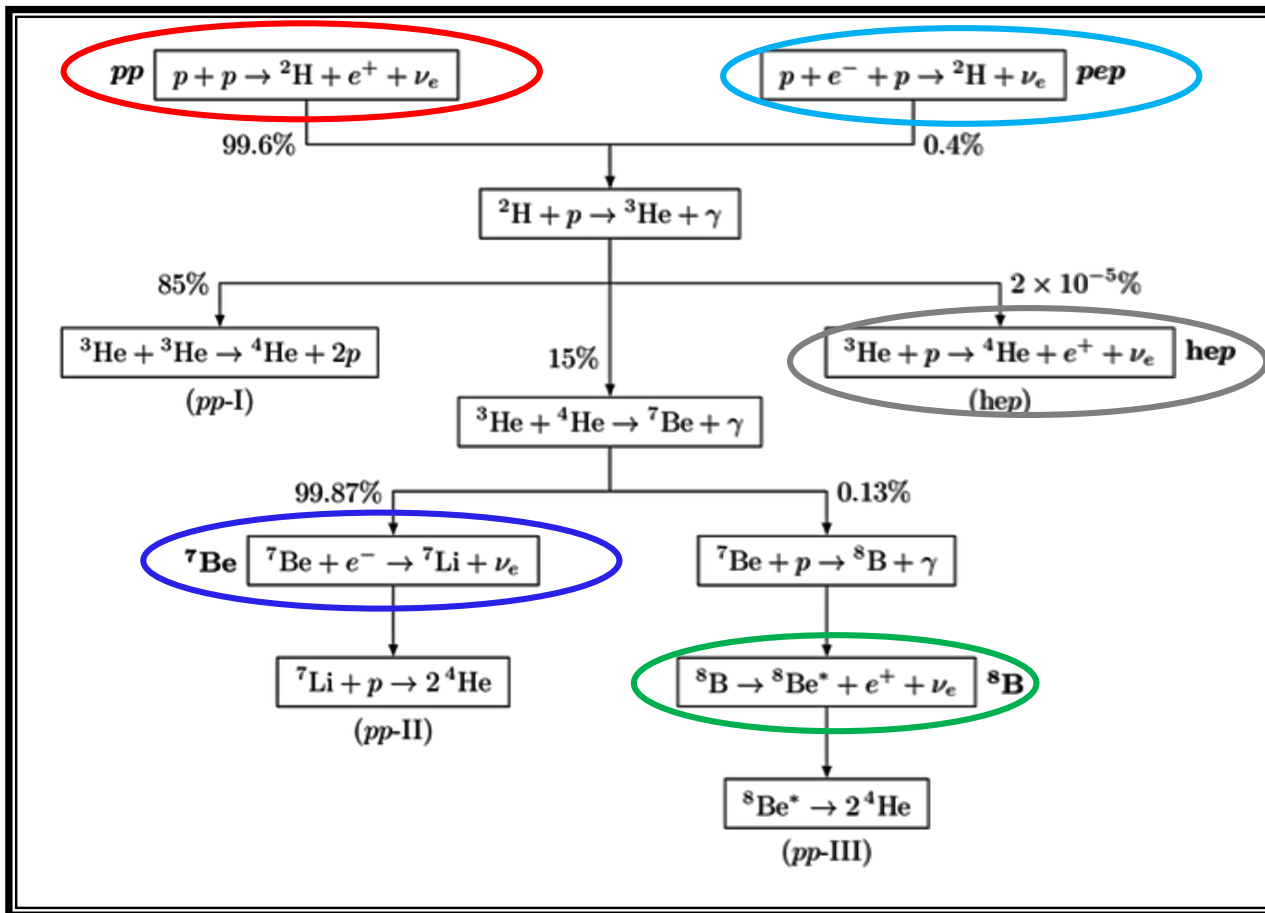
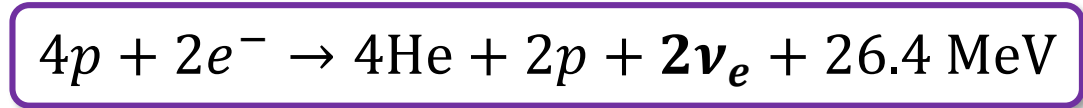


Ciclo CNO: nel Sole 1%,  
dominante per stelle più  
massive

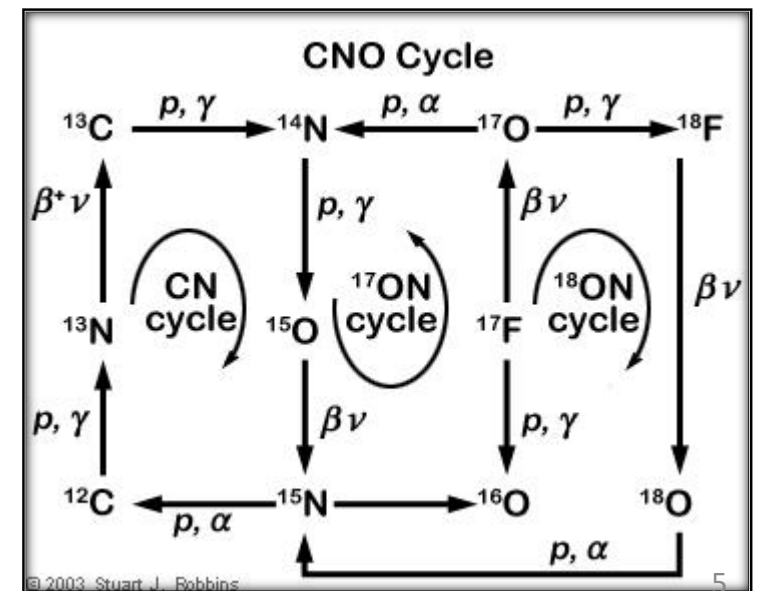


# Neutrini solari

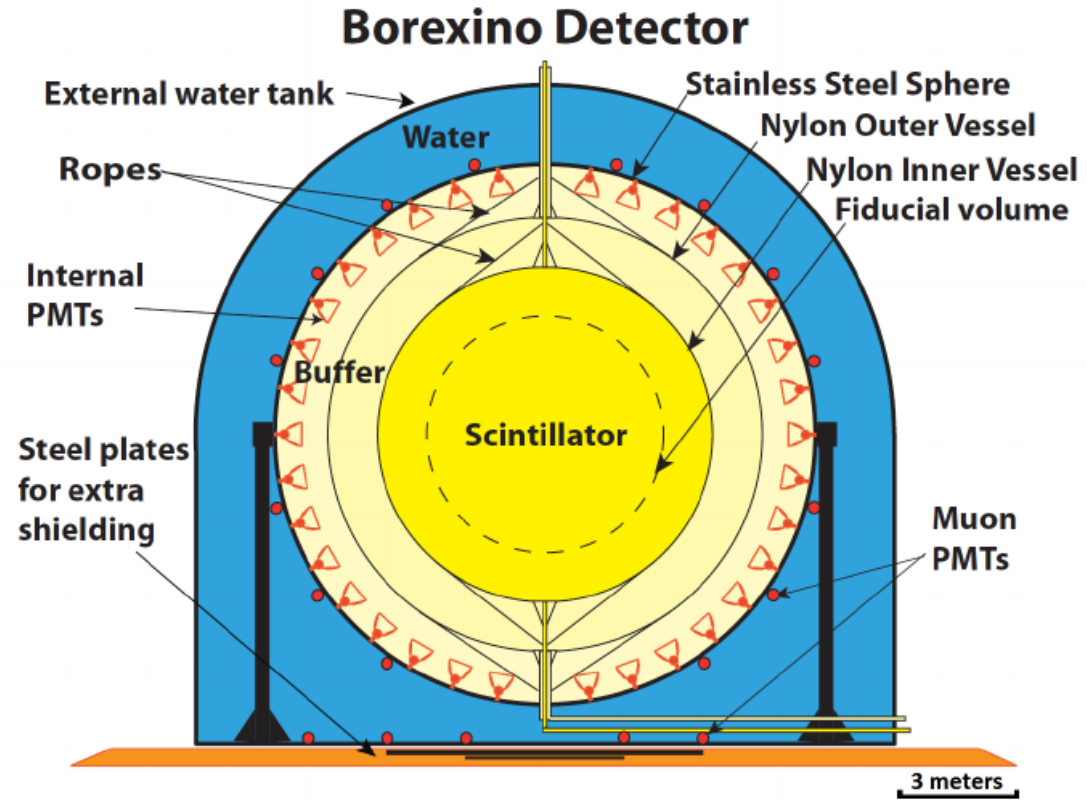
- Reazioni di fusione nucleare → emissione di neutrini
- “Fotografia” dell’interno del Sole
- Catena pp: dominante nel Sole (99%) →



↑  
Ciclo CNO: nel Sole 1%,  
dominante per stelle più  
massive

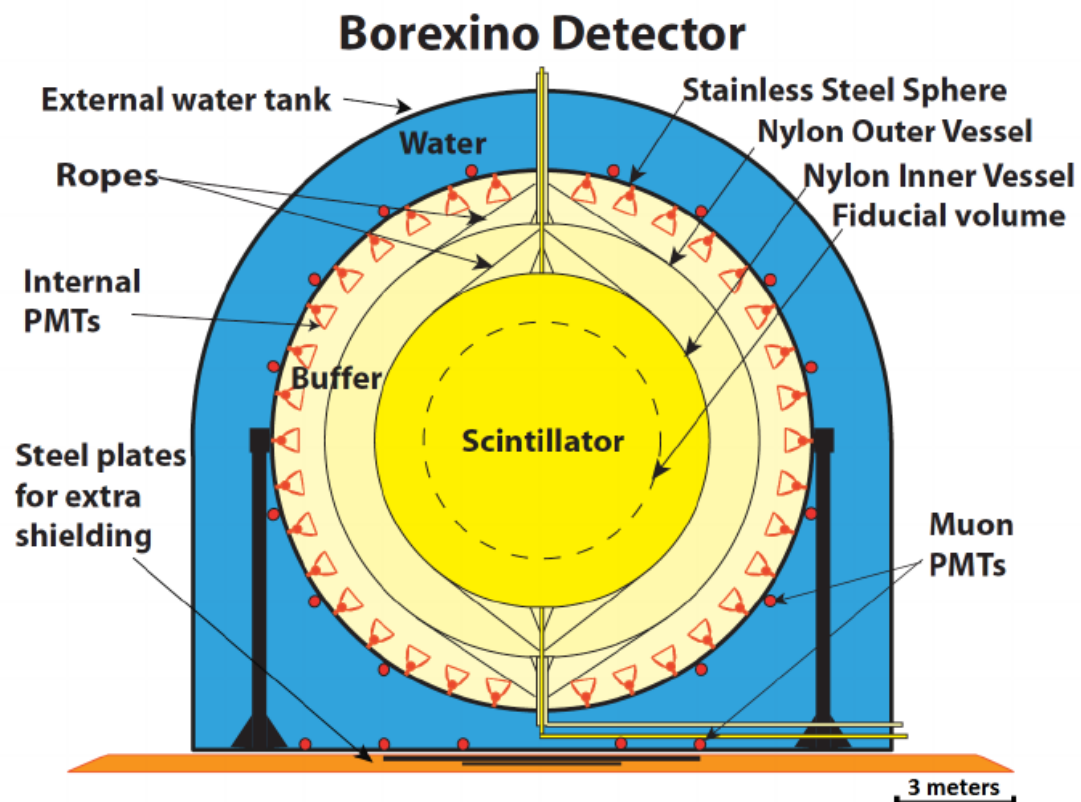


# Borexino





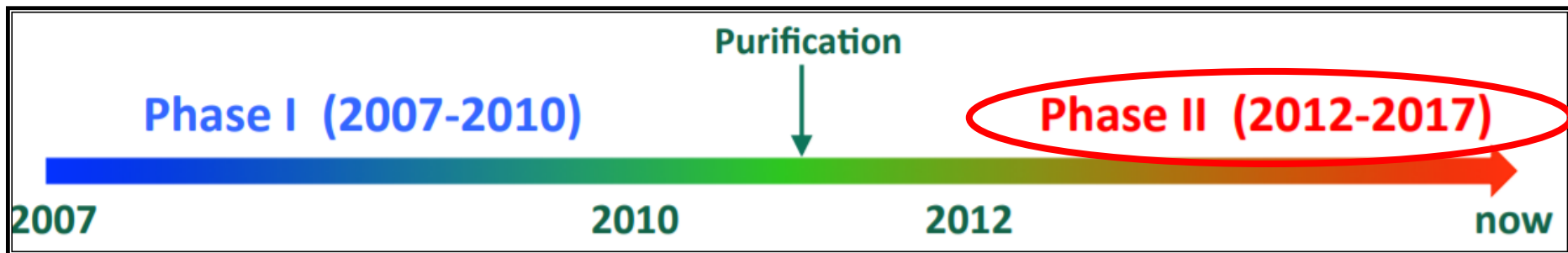
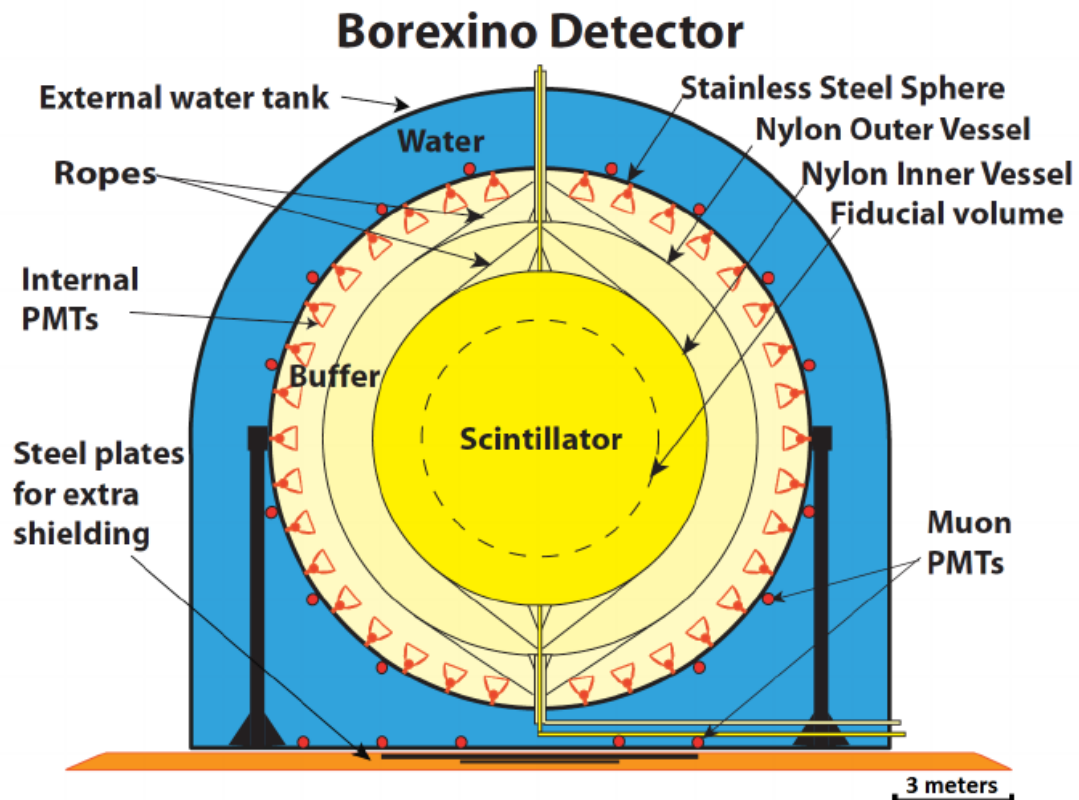
# Borexino



- Dal 2007 @ LNGS
- Misura di  $\nu$  solari di bassa energia: 300 ton di scintillatore liquido ultrapuro
- Bassissimo fondo radioattivo
- Rivelazione con scattering elastico:
$$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^- \quad x = e, \mu, \tau$$
- 2000 fotomoltiplicatori:
  - Posizione  $\rightarrow$  tempi di arrivo fotoni
  - Energia  $\rightarrow$  numero fotoni

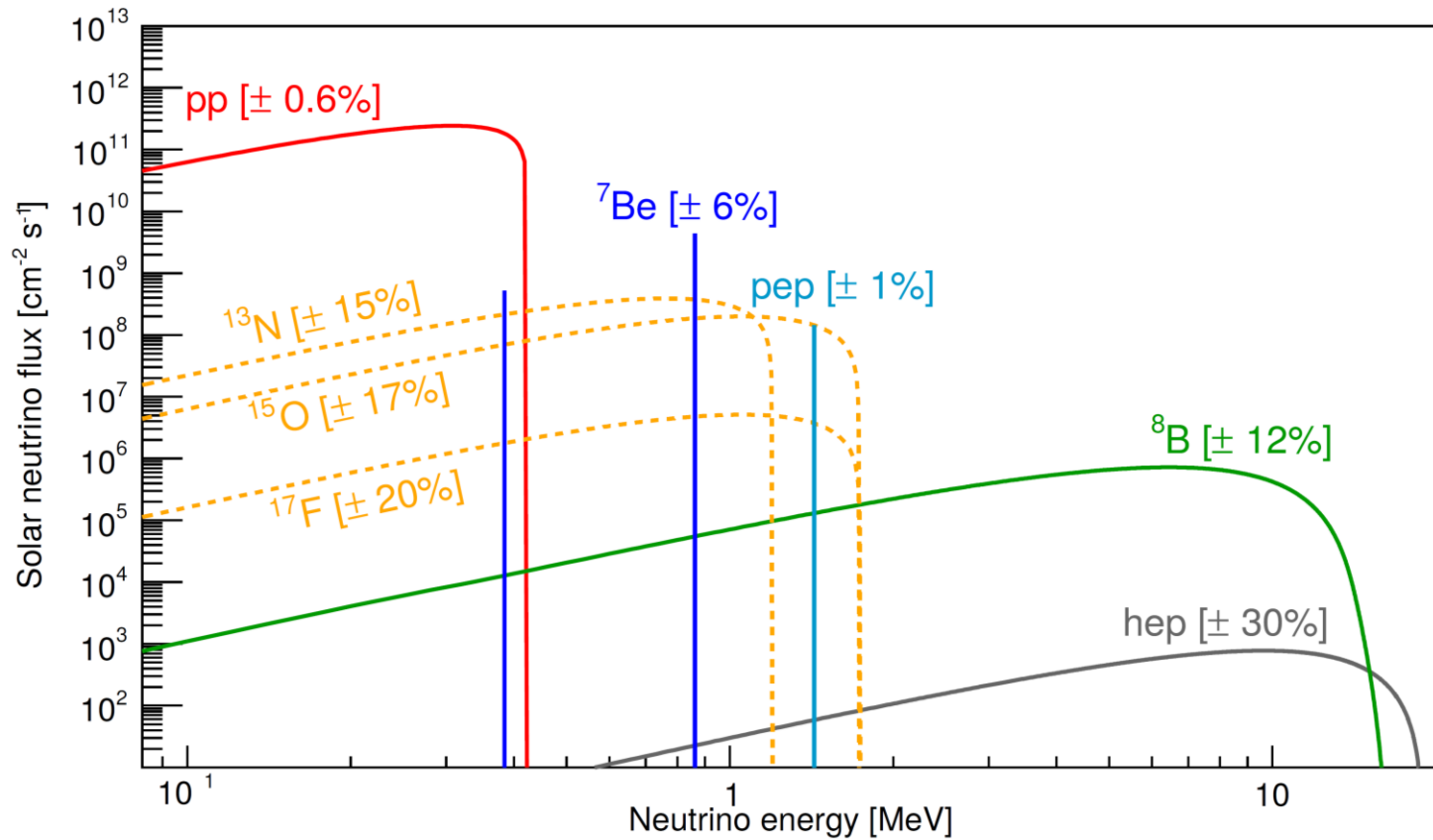
# Borexino

- Dal 2007 @ LNGS
- Misura di  $\nu$  solari di bassa energia: 300 ton di scintillatore liquido ultrapuro
- Bassissimo fondo radioattivo
- Rivelazione con scattering elastico:
$$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^- \quad x = e, \mu, \tau$$
- 2000 fotomoltiplicatori:
  - Posizione  $\rightarrow$  tempi di arrivo fotoni
  - Energia  $\rightarrow$  numero fotoni



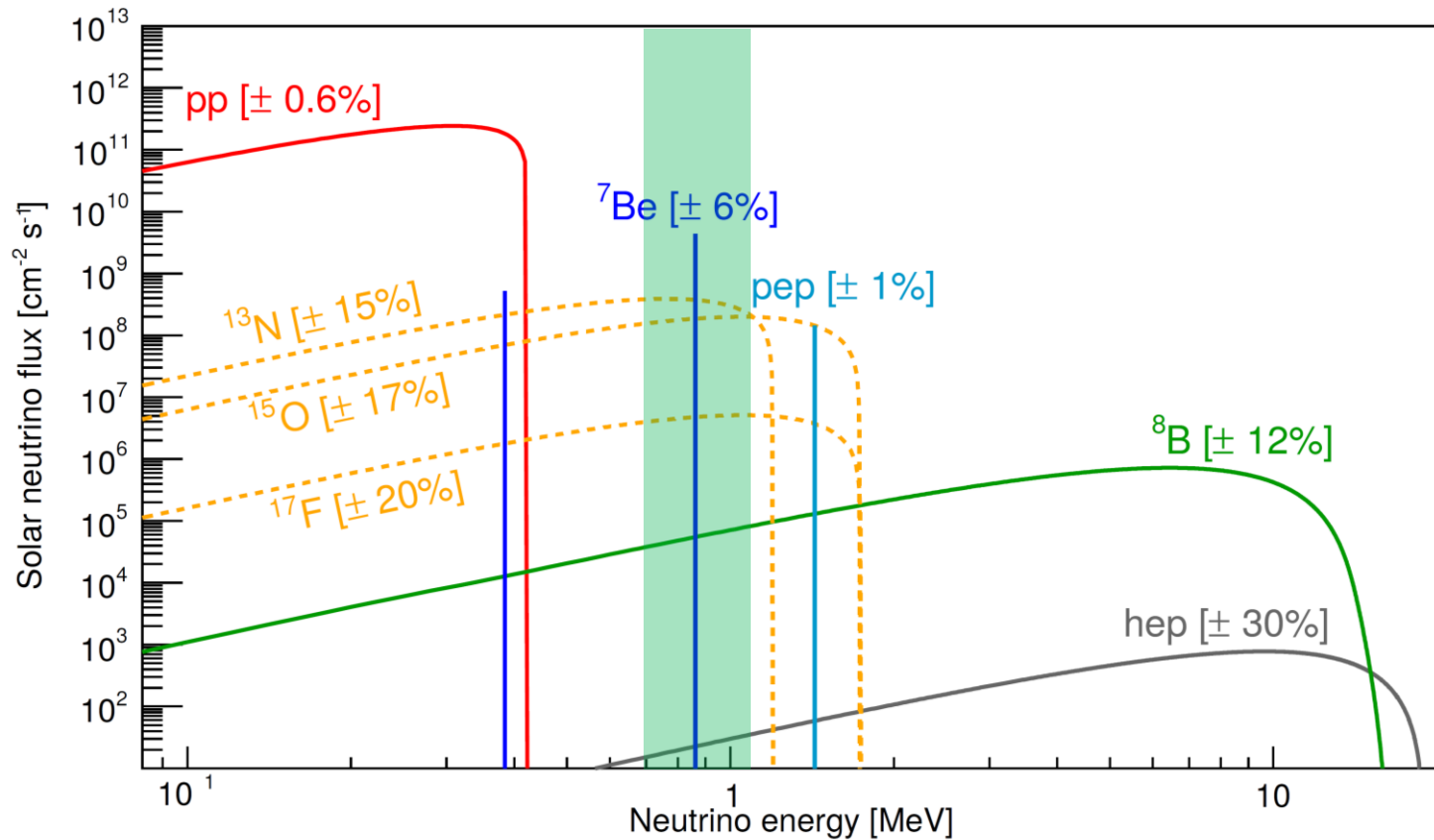


# Neutrini solari – Spettro energetico



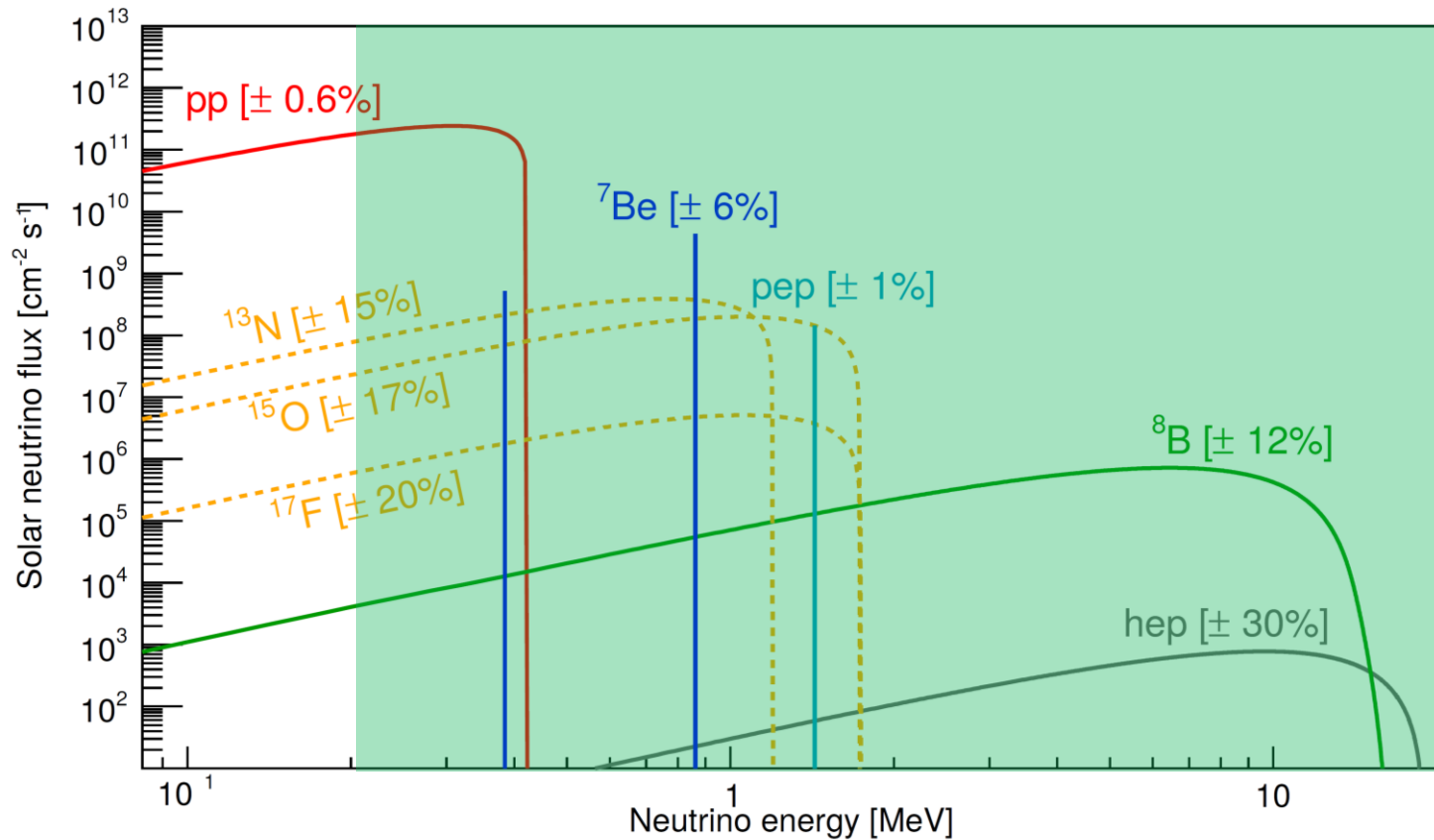
- Spettro di neutrini solari atteso
- Modello Solare Standard B16

# Neutrini solari – Spettro energetico



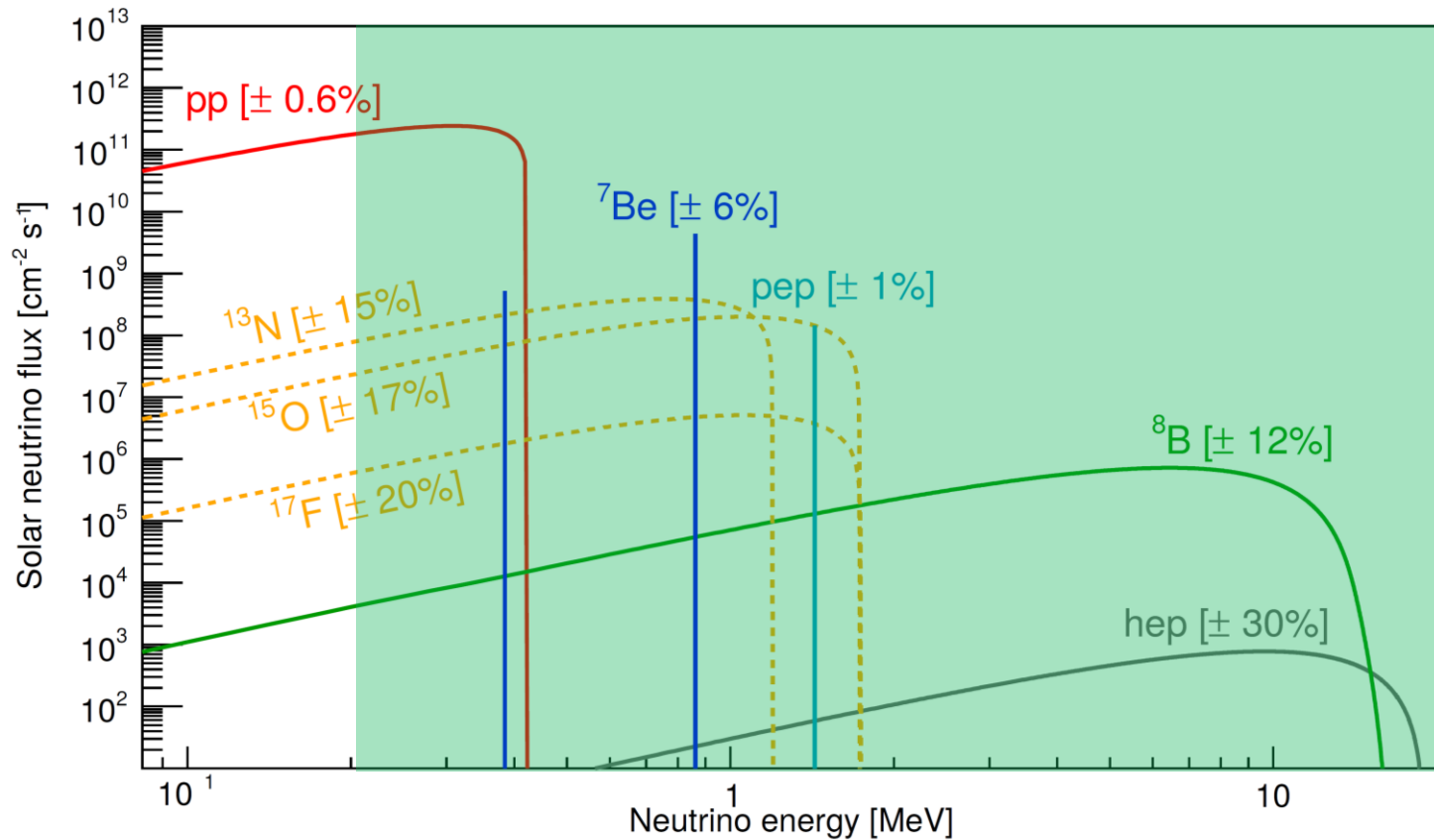
- Spettro di neutrini solari atteso
- Modello Solare Standard B16
- Borexino:
  - obiettivo iniziale:  
misura di  $\nu$  da  $^7\text{Be}$

# Neutrini solari – Spettro energetico



- Spettro di neutrini solari atteso
- Modello Solare Standard B16
- Borexino:
  - obiettivo iniziale: misura di  $\nu$  da  $^7\text{Be}$
  - obiettivo raggiunto: tutti i  $\nu$  dalla catena pp

# Neutrini solari – Spettro energetico



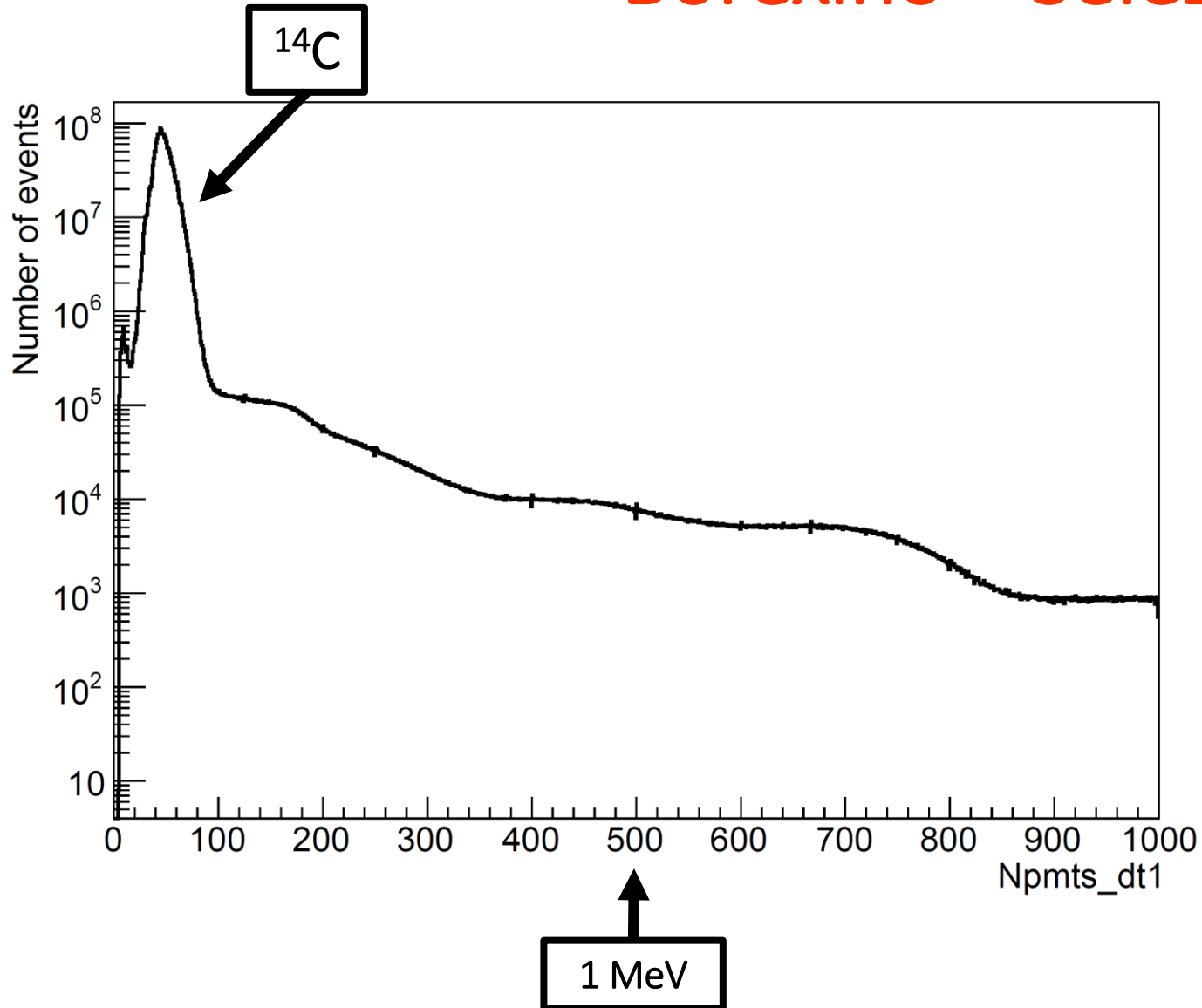
- Spettro di neutrini solari atteso
- Modello Solare Standard B16
- Borexino:
  - **obiettivo iniziale:**  
misura di  $\nu$  da  $^7\text{Be}$
  - **obiettivo raggiunto:**  
tutti i  $\nu$  dalla catena pp

Neutrini solari

Astrofisica: modelli solari, metallicità...

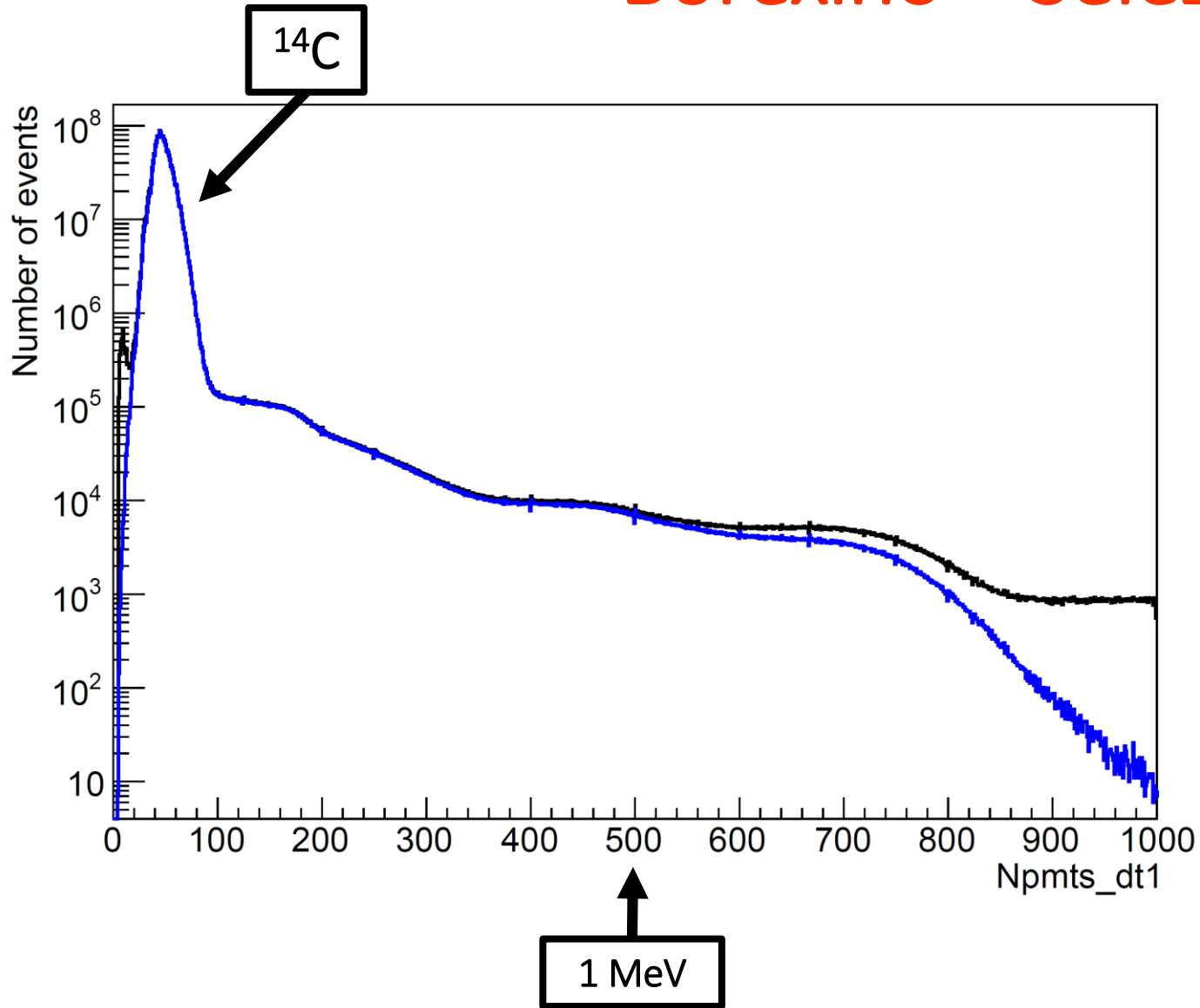
Fisica del neutrino: oscillazioni di sapore

# Borexino – Selezione dati



- Spettro grezzo rivelato: nessun taglio

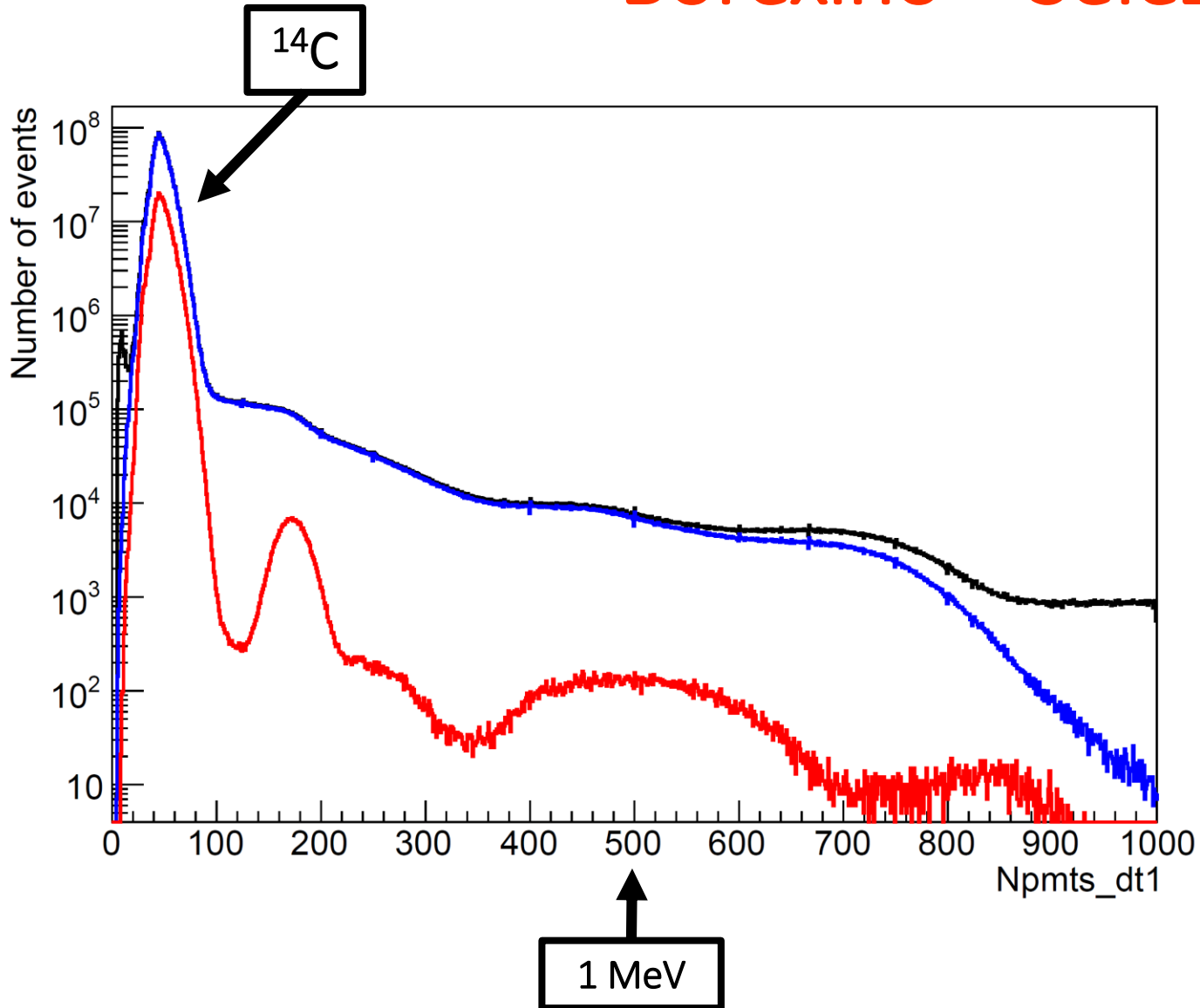
# Borexino – Selezione dati



- Spettro grezzo rivelato: nessun taglio
- Spettro dopo taglio muoni

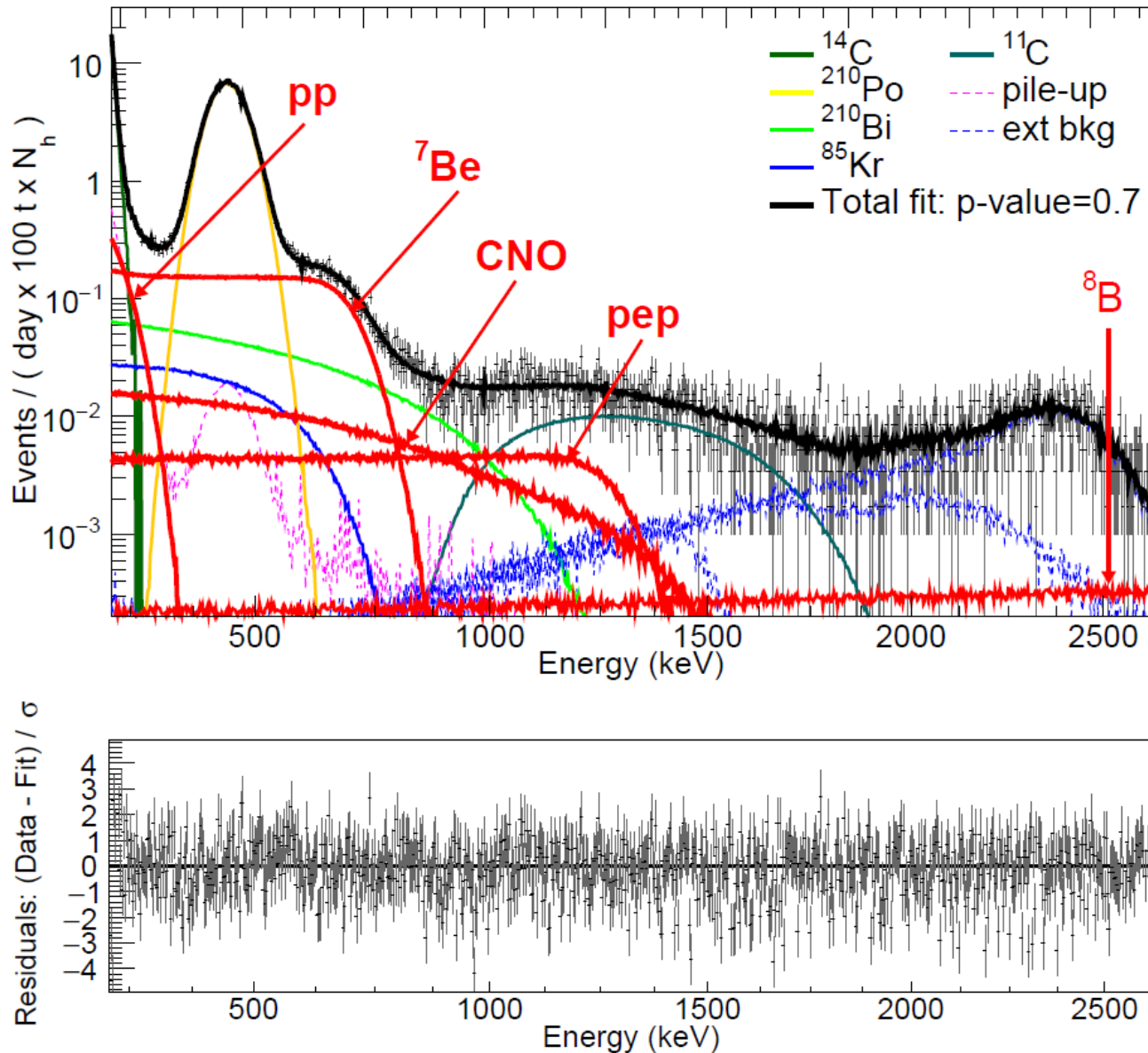


# Borexino – Selezione dati



- Spettro grezzo rivelato: nessun taglio
- Spettro dopo taglio muoni
- Spettro dopo selezione di Volume Fiduciale

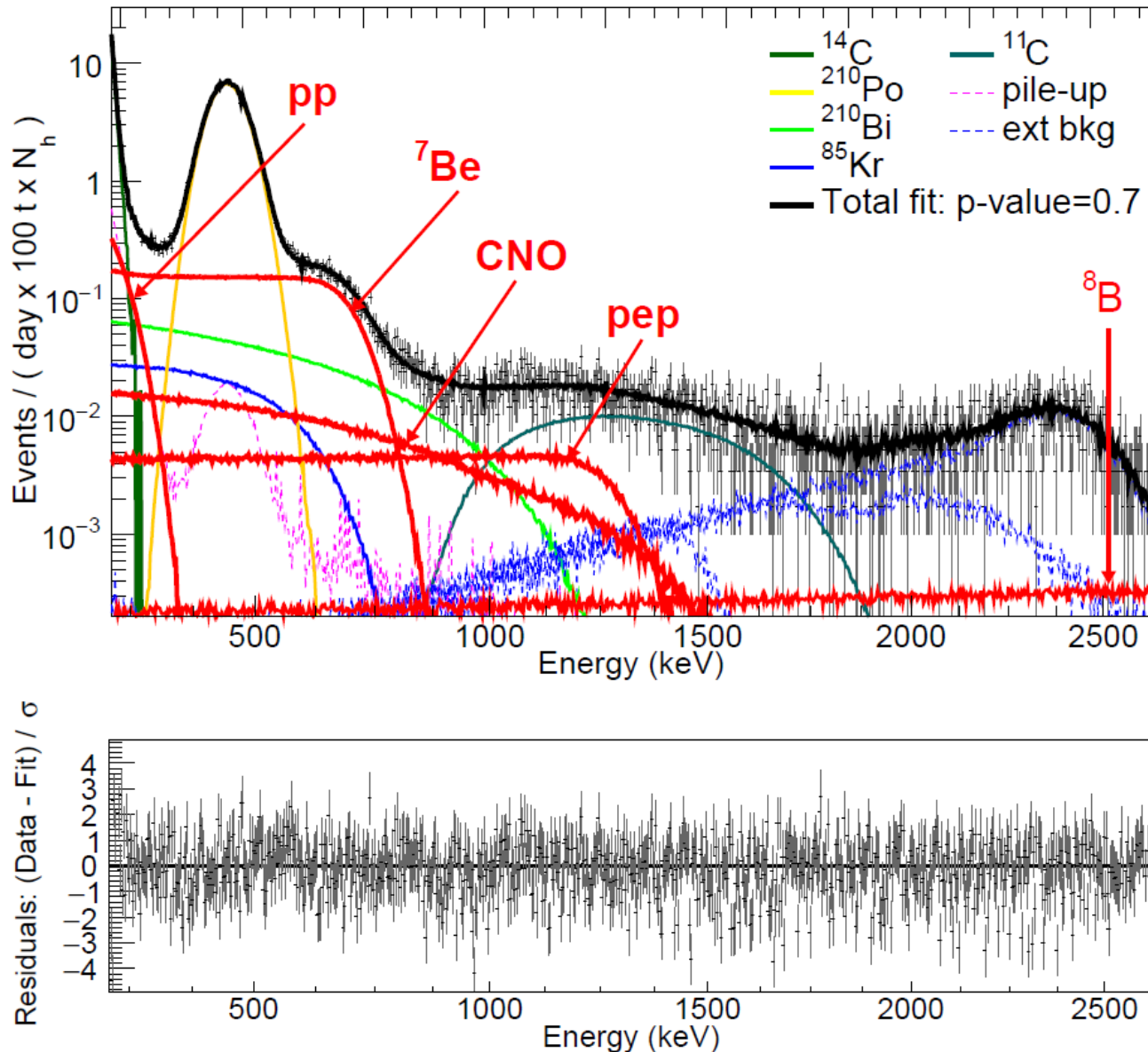
# Spettro energetico a bassa energia: fit simultaneo



Fit simultaneo delle componenti a bassa energia  
(pp, <sup>7</sup>Be, pep + limite CNO)

- Esposizione 1.6 volte la Fase 1
- Fit da 0.19 MeV a 2.93 MeV.

# Spettro energetico a bassa energia: fit simultaneo



Fit simultaneo delle componenti a bassa energia  
(pp,  $^7\text{Be}$ , pep + limite CNO)

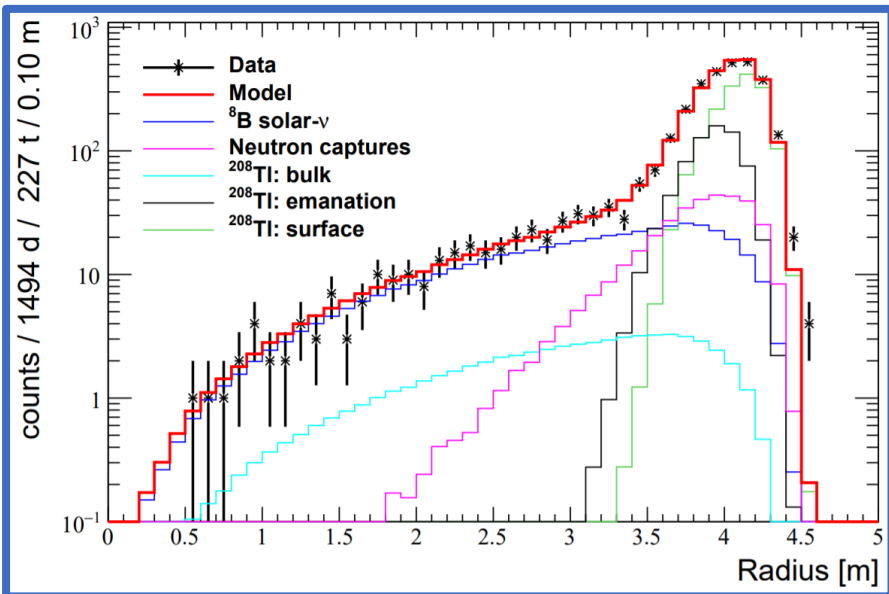
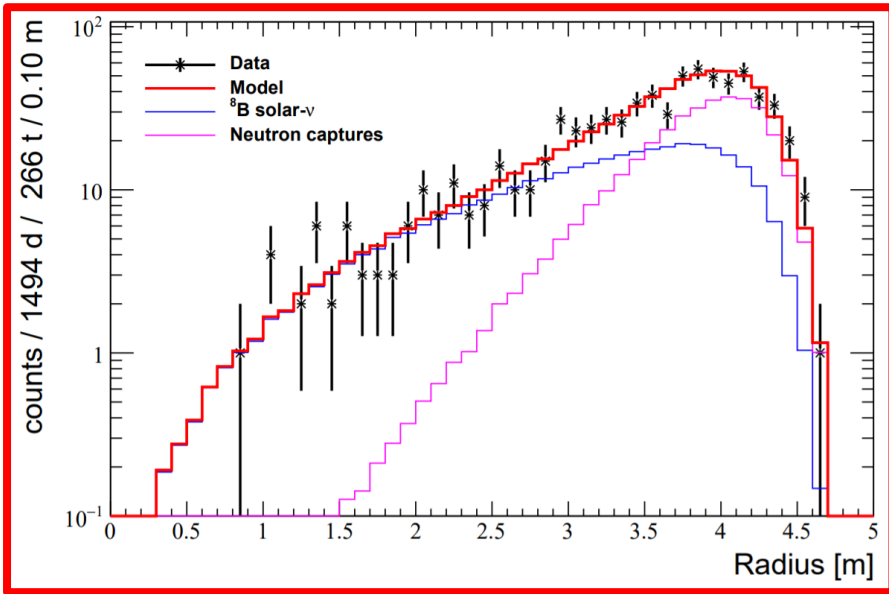
- Esposizione 1.6 volte la Fase 1
- Fit da 0.19 MeV a 2.93 MeV.

Due metodi complementari:

1. **Analitico:** flessibile per variazioni di risposta del rivelatore / propenso a correlazioni
2. **Monte Carlo:** tuning indipendente dei parametri / precisione migliore del %

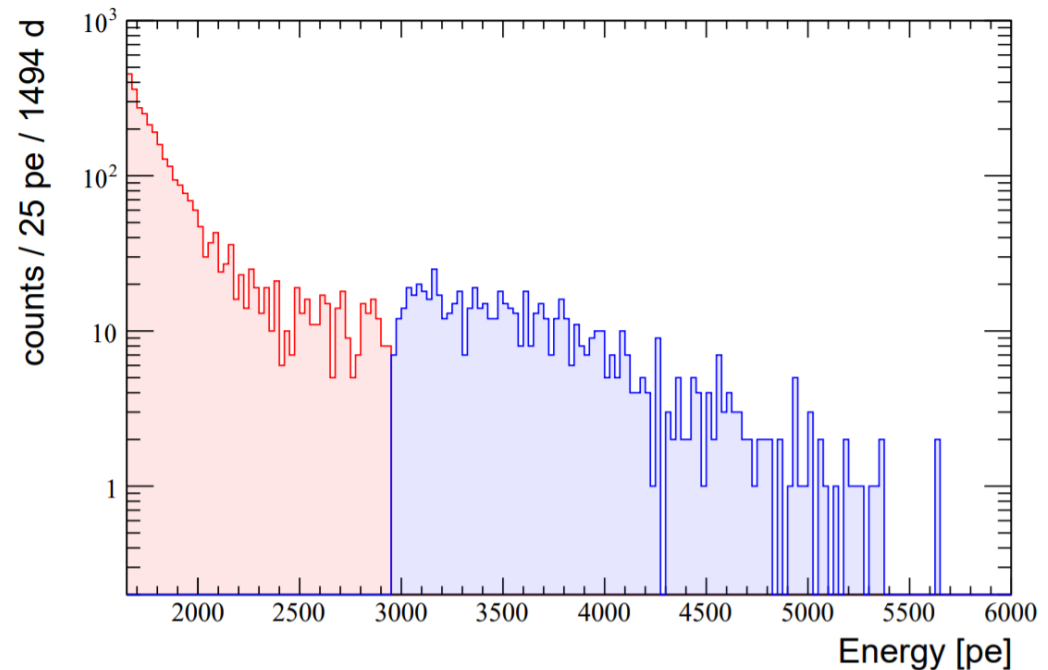
**Fit multivariato:** minimizzazione di likelihood binnata

# Fit per neutrini da $^8\text{B}$



- Analisi separata
- Esposizione 11.5 volte Fase 1
- Fit **radiale** in due finestre di energia separate per la gestione del fondo: **3.2-5 MeV** e **5-17 MeV**
- Precisione sul flusso: **8%**

## Eventi di $^8\text{B}$ dopo selezione



# Risultati dei fit

v solari	Rate (cpd/100 t)	Flusso ( $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	Flux –SSM predictions B16 ( $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )
pp	$134 \pm 10_{-10}^{+6}$	$(6.1 \pm 0.5_{-0.5}^{+0.3}) \times 10^{10}$	$5.98(1. \pm 0.006) \times 10^{10}$ (HZ) $6.03(1. \pm 0.005) \times 10^{10}$ (LZ)
${}^7\text{Be}$	$48.3 \pm 1.1_{-0.7}^{+0.4}$	$(4.99 \pm 0.11_{-0.08}^{+0.06}) \times 10^9$	$4.93(1. \pm 0.06) \times 10^9$ (HZ) $4.50(1. \pm 0.06) \times 10^9$ (LZ)
pep (HZ)	$2.43 \pm 0.36_{-0.22}^{+0.15}$	$(1.27 \pm 0.19_{-0.12}^{+0.08}) \times 10^8$	$1.44(1. \pm 0.009) \times 10^8$ (HZ) $1.46(1. \pm 0.009) \times 10^8$ (LZ)
pep (LZ)	$2.65 \pm 0.36_{-0.24}^{+0.15}$	$(1.39 \pm 0.19_{-0.13}^{+0.08}) \times 10^8$	$1.44(1. \pm 0.009) \times 10^8$ (HZ) $1.46(1. \pm 0.009) \times 10^8$ (LZ)
${}^8\text{B}$	$0.223_{-0.016-0.006}^{+0.015+0.006}$	$(5.68_{-0.41-0.03}^{+0.39+0.03}) \times 10^6$	$5.46(1. \pm 0.12) \times 10^6$ (HZ) $4.50(1. \pm 0.12) \times 10^6$ (LZ)
CNO	< 8.1 (95 % C.L.)	< $7.9 \times 10^8$ (95 % C.L.)	$4.92(1. \pm 0.11) \times 10^8$ (HZ) $3.52(1. \pm 0.10) \times 10^8$ (LZ)
hep	< 0.002 (90% C.L.)	< $2.2 \times 10^5$ (90 % C.L.)	$7.98(1. \pm 0.30) \times 10^3$ (HZ) $8.25(1. \pm 0.12) \times 10^3$ (LZ)

[cpd/100ton: conteggi al giorno per 100 tonnellate di scintillatore]

- Risultati compatibili rispetto alla Fase 1 e **precisione migliorata**

# Risultati dei fit

$\nu$ solari	Rate (cpd/100 t)	Flusso ( $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	Flux –SSM predictions B16 ( $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )
pp	$134 \pm 10_{-10}^{+6}$	$(6.1 \pm 0.5_{-0.5}^{+0.3}) \times 10^{10}$	$5.98(1. \pm 0.006) \times 10^{10}$ (HZ) $6.03(1. \pm 0.005) \times 10^{10}$ (LZ)
$^7\text{Be}$	$48.3 \pm 1.1_{-0.7}^{+0.4}$	$(4.99 \pm 0.11_{-0.08}^{+0.06}) \times 10^9$	$4.93(1. \pm 0.06) \times 10^9$ (HZ) $4.50(1. \pm 0.06) \times 10^9$ (LZ)
pep (HZ)	$2.43 \pm 0.36_{-0.22}^{+0.15}$	$(1.27 \pm 0.19_{-0.12}^{+0.08}) \times 10^8$	$1.44(1. \pm 0.009) \times 10^8$ (HZ) $1.46(1. \pm 0.009) \times 10^8$ (LZ)
pep (LZ)	$2.65 \pm 0.36_{-0.24}^{+0.15}$	$(1.39 \pm 0.19_{-0.13}^{+0.08}) \times 10^8$	$1.44(1. \pm 0.009) \times 10^8$ (HZ) $1.46(1. \pm 0.009) \times 10^8$ (LZ)
$^8\text{B}$	$0.223_{-0.016-0.006}^{+0.015+0.006}$	$(5.68_{-0.41-0.03}^{+0.39+0.03}) \times 10^6$	$5.46(1. \pm 0.12) \times 10^6$ (HZ) $4.50(1. \pm 0.12) \times 10^6$ (LZ)
CNO	$< 8.1$ (95 % C.L.)	$< 7.9 \times 10^8$ (95 % C.L.)	$4.92(1. \pm 0.11) \times 10^8$ (HZ) $3.52(1. \pm 0.10) \times 10^8$ (LZ)
hep	$< 0.002$ (90% C.L.)	$< 2.2 \times 10^5$ (90 % C.L.)	$7.98(1. \pm 0.30) \times 10^3$ (HZ) $8.25(1. \pm 0.12) \times 10^3$ (LZ)

[cpd/100ton: conteggi al giorno per 100 tonnellate di scintillatore]

- Risultati compatibili rispetto alla Fase 1 e **precisione migliorata**
- **Assenza di neutrini pep rigettata ad oltre  $5\sigma$  / Limite su CNO**
- La simultaneità del fit a bassa E limita possibili correlazioni tra le specie di neutrini

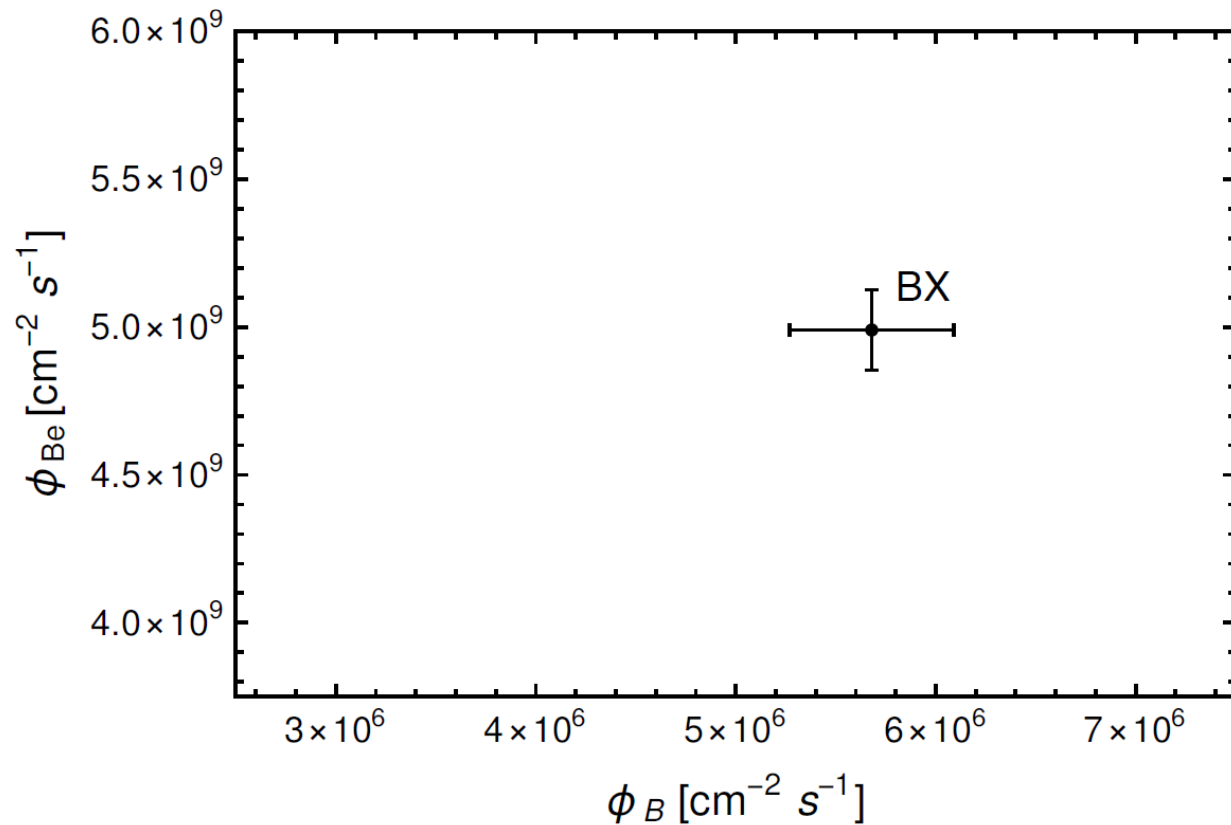


# Implicazioni: metallicità solare

Metallicità solare: abbondanza di elementi più massivi di He  
Fondamentale per la costruzione di modelli solari

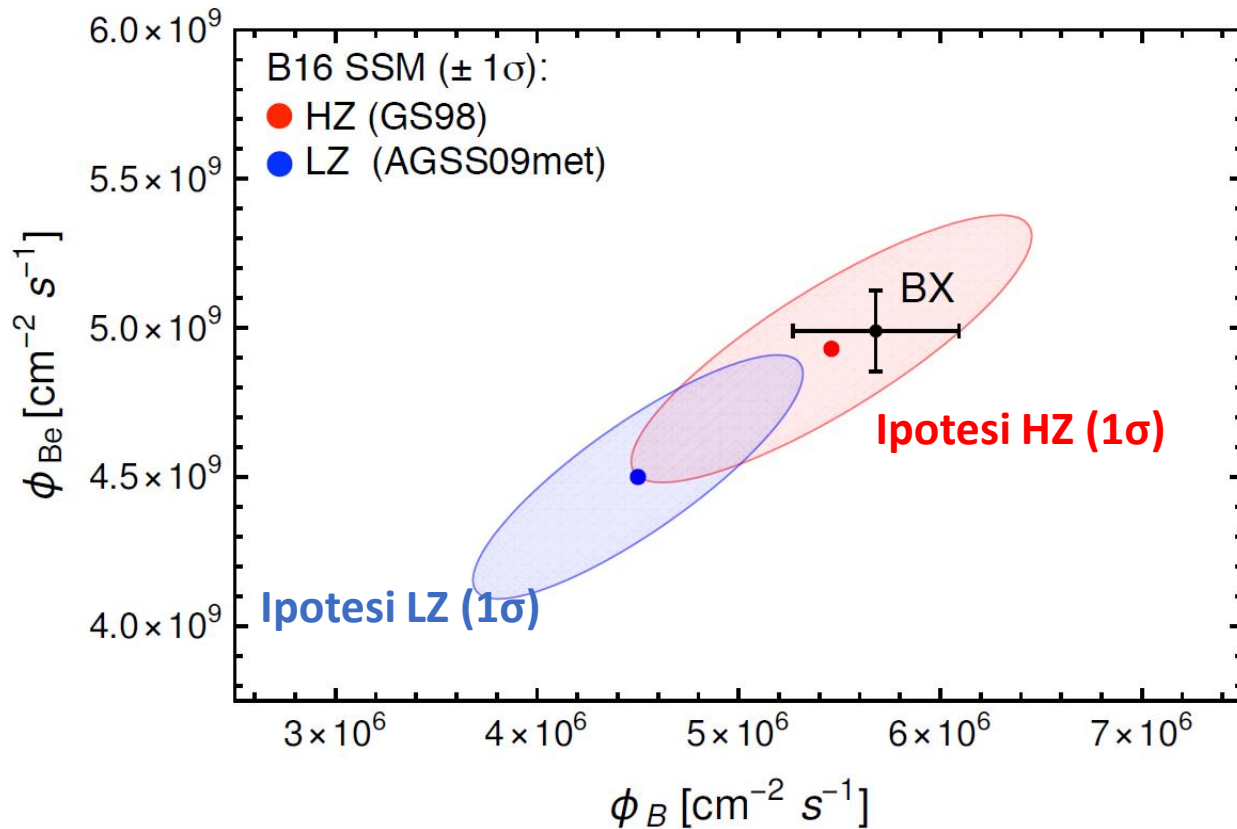
# Implicazioni: metallicità solare

Metallicità solare: abbondanza di elementi più massivi di He  
Fondamentale per la costruzione di modelli solari



# Implicazioni: metallicità solare

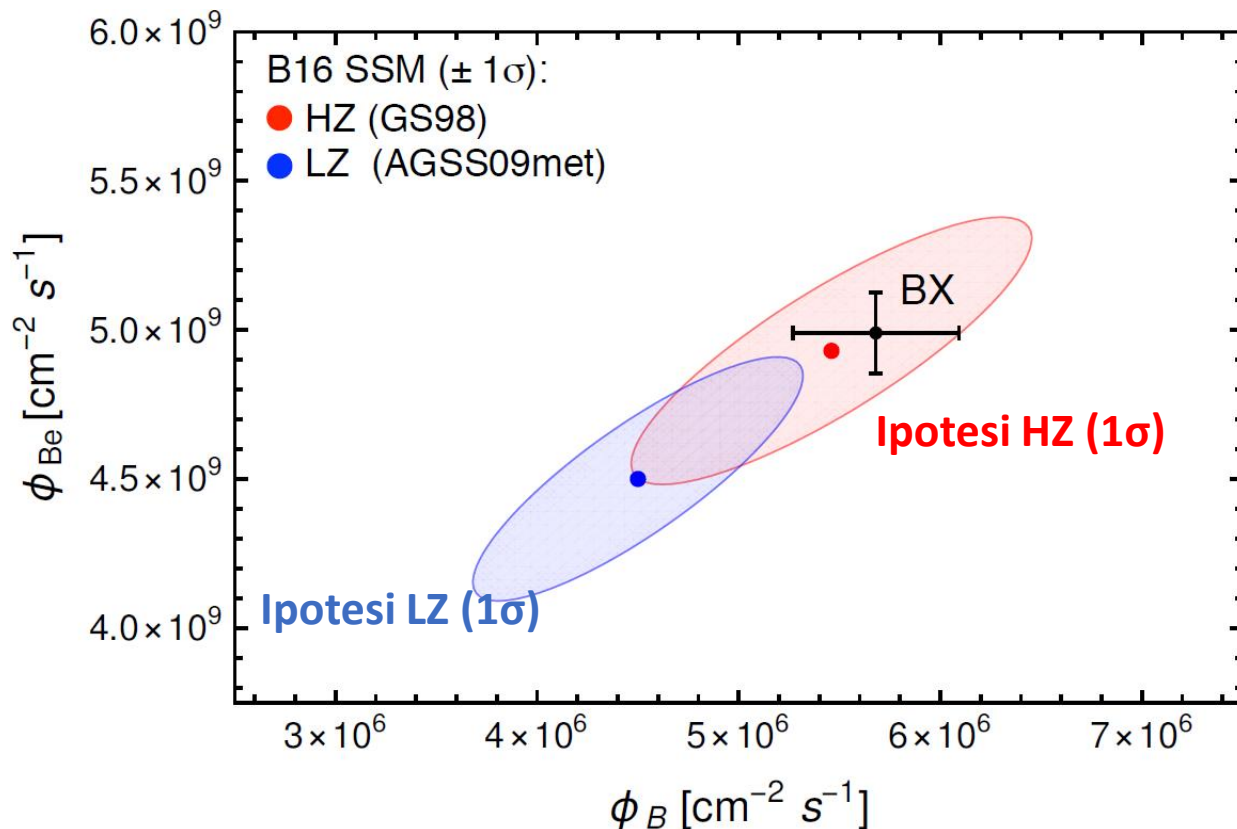
Metallicità solare: abbondanza di elementi più massivi di He  
Fondamentale per la costruzione di modelli solari



- $v$  da  ${}^7\text{Be}$  e  ${}^8\text{B}$ : modello con differenze del 9% e 18% a seconda dell'**alta** o **bassa** metallicità
- Incertezza dominante: teorica, su modelli solari

# Implicazioni: metallicità solare

Metallicità solare: abbondanza di elementi più massivi di He  
Fondamentale per la costruzione di modelli solari



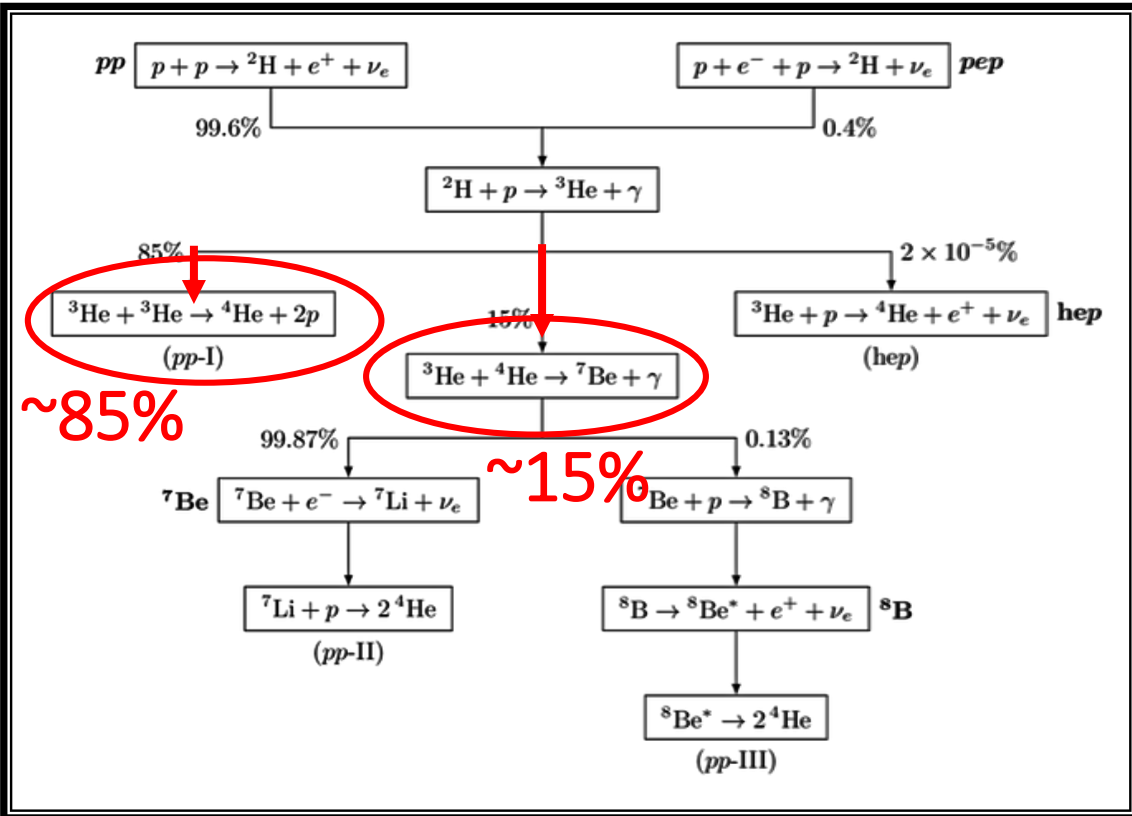
- $v$  da  ${}^7\text{Be}$  e  ${}^8\text{B}$ : modello con differenze del 9% e 18% a seconda dell'**alta** o **bassa** metallicità
- Incertezza dominante: teorica, su modelli solari

Indicazione debole **verso alta met.**  
(bassa met. sfavorita a  $1.5\sigma$ )

# Implicazioni: fusione solare

- Ramificazioni della catena pp (da Flussi da pp e da  ${}^7\text{Be}$ )

$$R = \frac{\langle {}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rangle}{\langle {}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rangle}$$

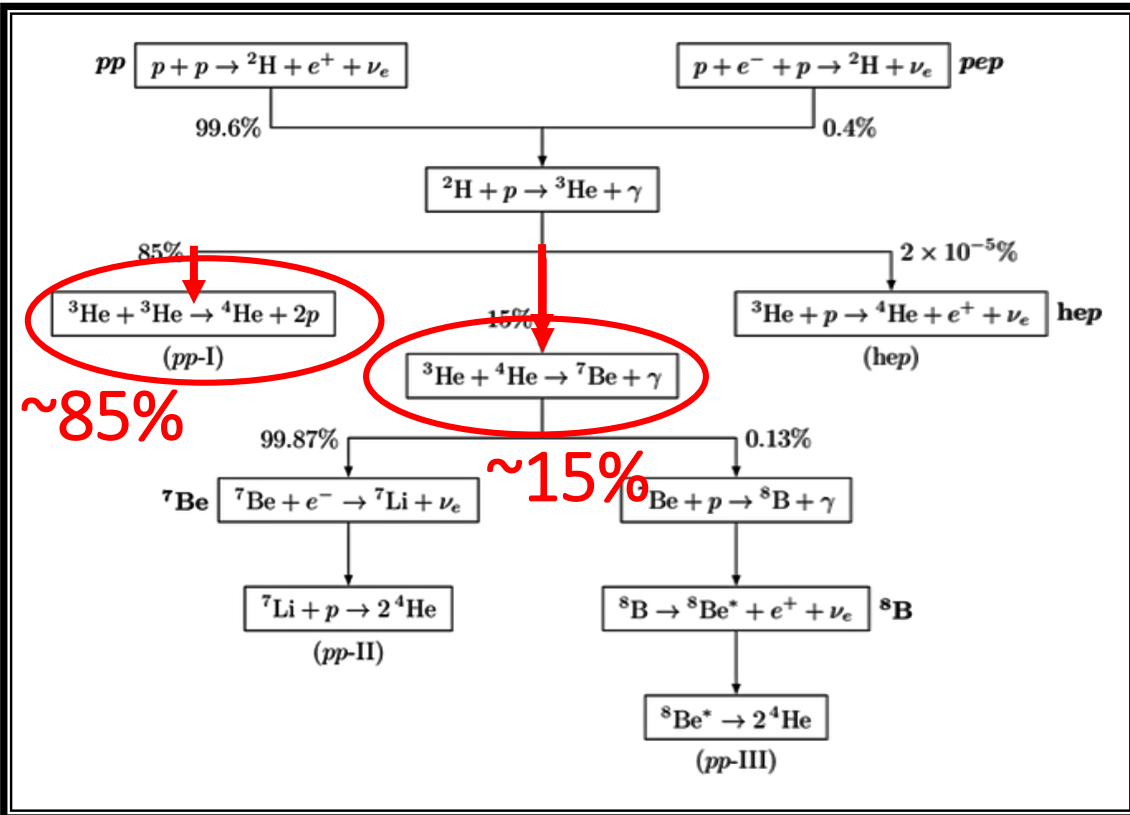


# Implicazioni: fusione solare

- Ramificazioni della catena pp (da Flussi da pp e da  ${}^7\text{Be}$ )

$$R = \frac{\langle {}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rangle}{\langle {}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rangle}$$

- Test sperimentale per la fusione solare





# Implicazioni: fusione solare

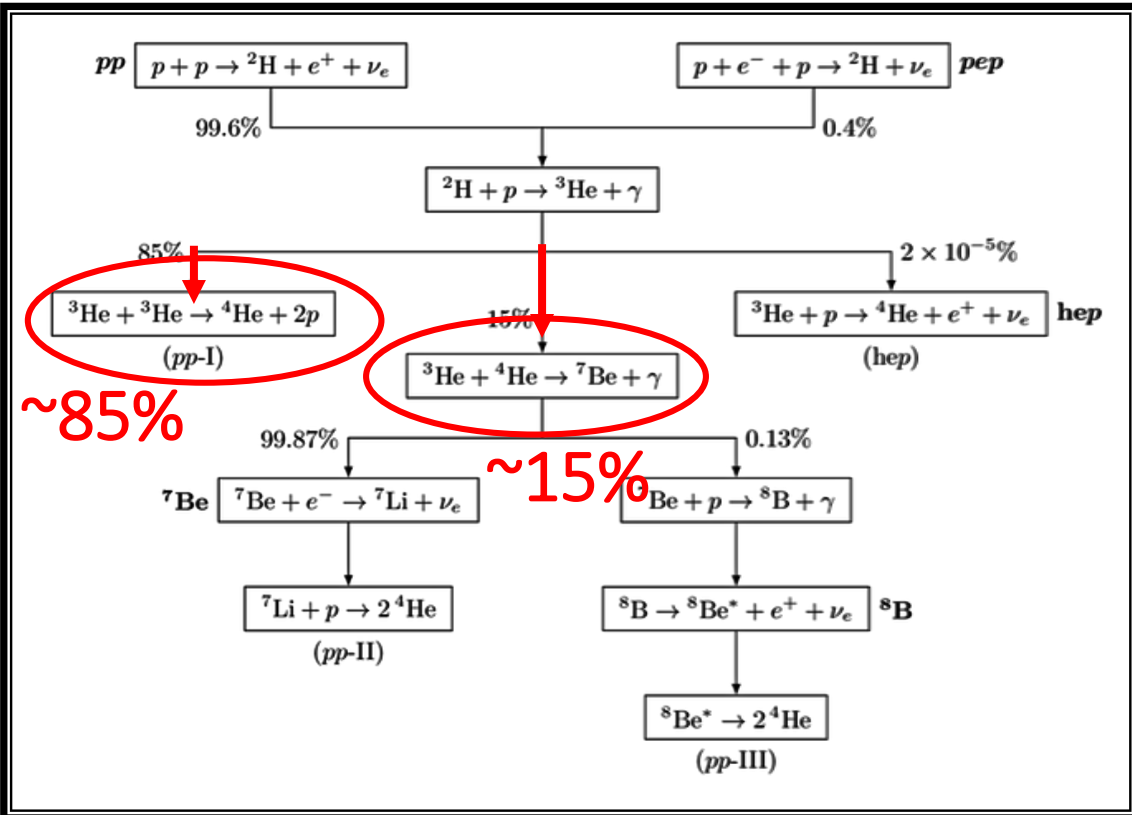
- Ramificazioni della catena pp (da Flussi da pp e da  ${}^7\text{Be}$ )

$$R = \frac{\langle {}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rangle}{\langle {}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rangle}$$

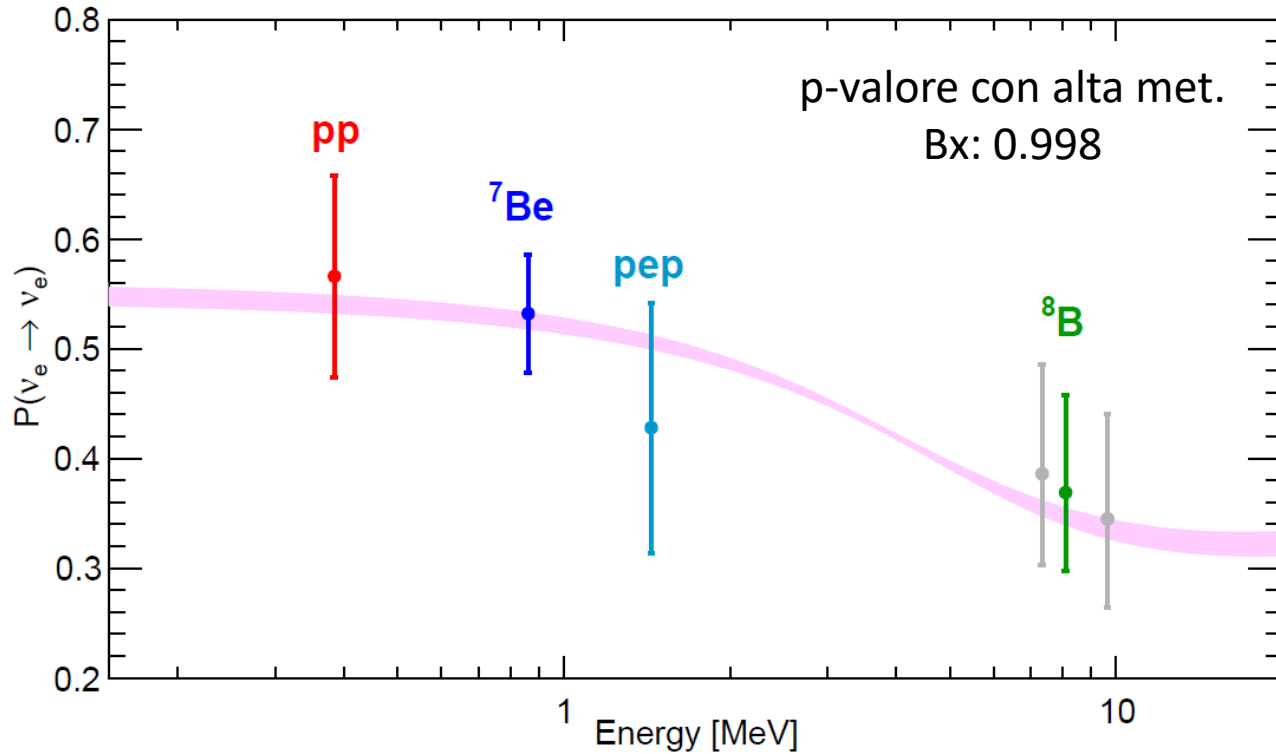
- Test sperimentale per la fusione solare

Predizione teorica:  
 $R(\text{HZ}) = 0.18 \pm 0.01$   
 $R(\text{LZ}) = 0.16 \pm 0.01$

Borexino:  
 $R = 0.18 \pm 0.02$

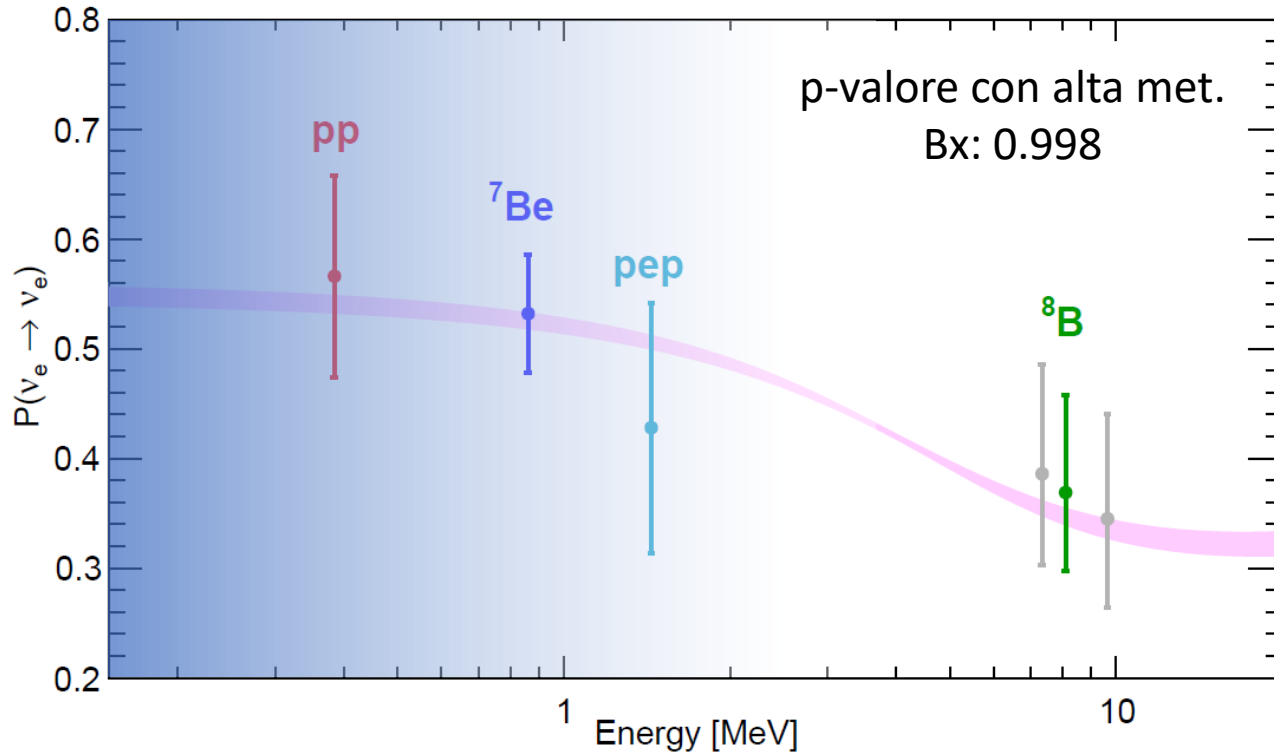


# Implicazioni: probabilità di sopravvivenza $\nu_e$



- Rate di interazione  $\rightarrow$  probabilità di sopravvivenza  $\nu_e$  a diverse energie  $P(\nu_e \rightarrow \nu_e)$

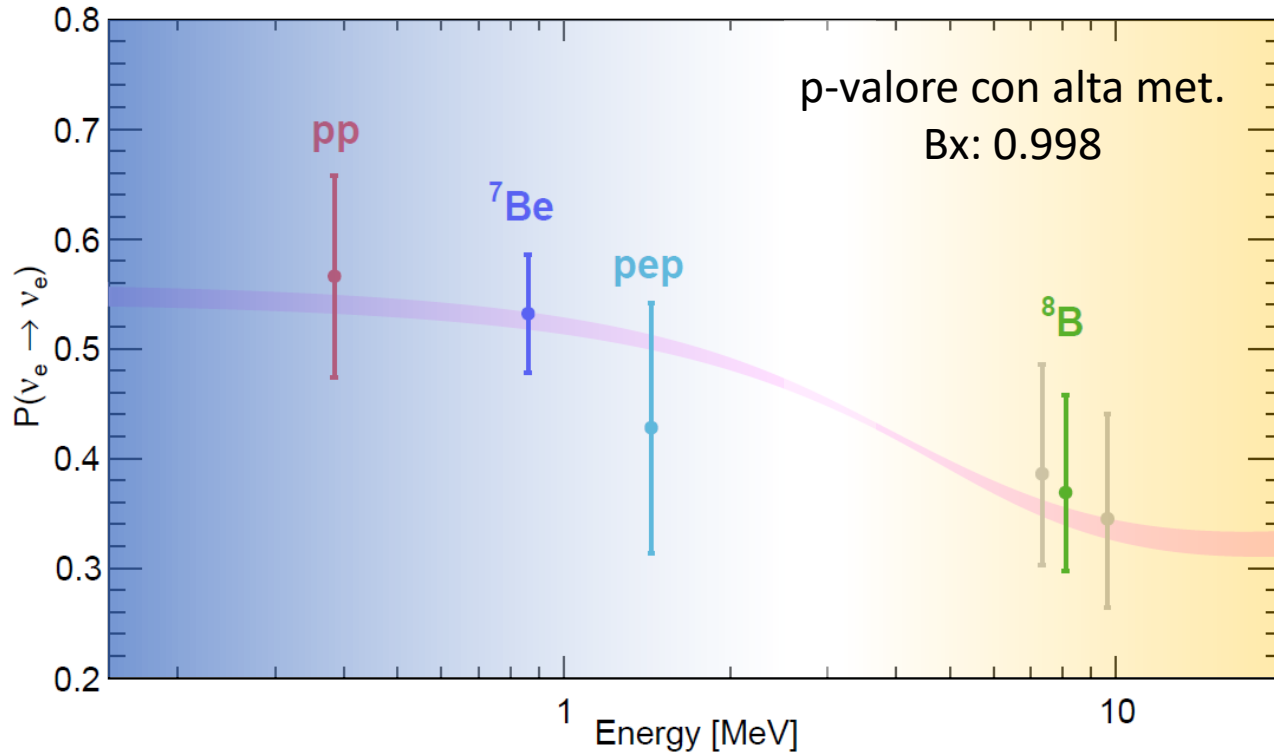
# Implicazioni: probabilità di sopravvivenza $\nu_e$



- Rate di interazione  $\rightarrow$  probabilità di sopravvivenza  $\nu_e$  a diverse energie  $P(\nu_e \rightarrow \nu_e)$
- Test a **bassa E** che ad **alta E** e confronto con **predizione oscillazione  $\nu_e$  secondo MSW-LMA**
  - Bassa E: miglior precisione finora
  - Alta E: accordo con SK e SNO

osc. **nel vuoto**  
dominante

# Implicazioni: probabilità di sopravvivenza $\nu_e$

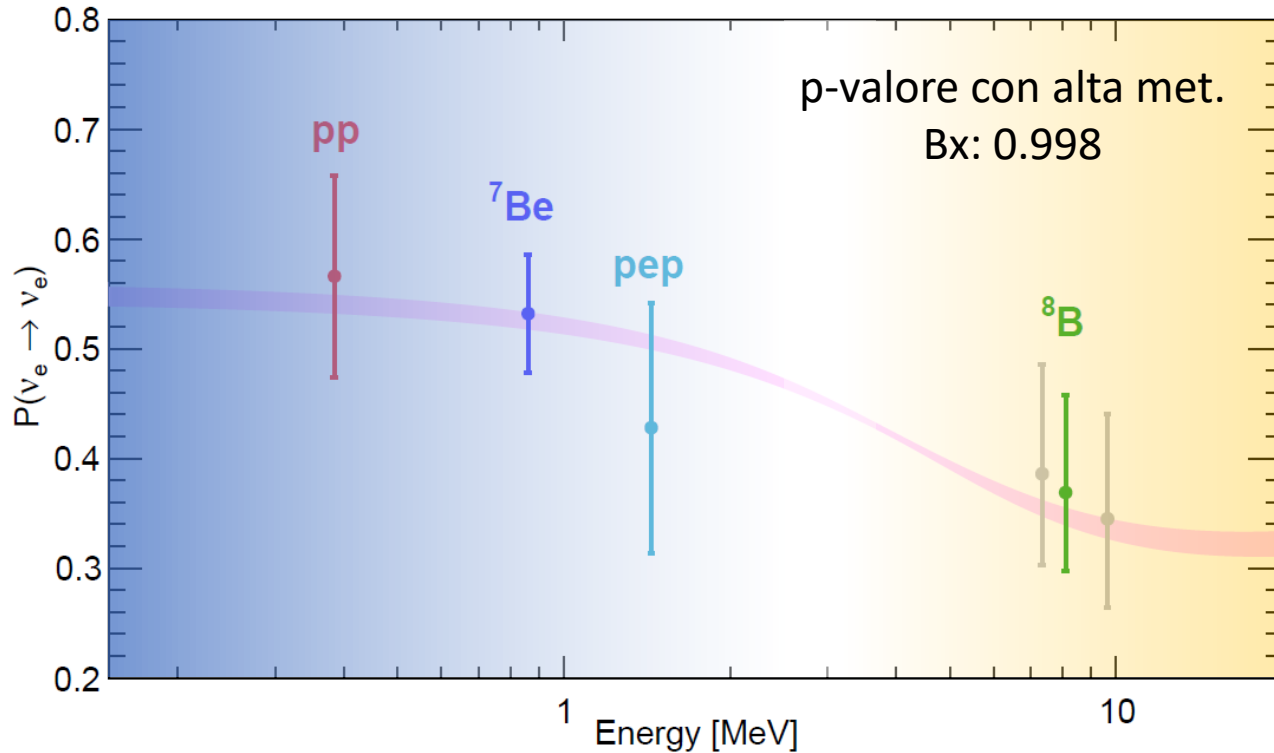


- Rate di interazione  $\rightarrow$  probabilità di sopravvivenza  $\nu_e$  a diverse energie  $P(\nu_e \rightarrow \nu_e)$
- Test a **bassa E** che ad **alta E** e confronto con **predizione oscillazione  $\nu_e$  secondo MSW-LMA**
  - Bassa E: miglior precisione finora
  - Alta E: accordo con SK e SNO

osc. **nel vuoto**  
dominante

osc. **nella materia**  
dominante

# Implicazioni: probabilità di sopravvivenza $\nu_e$



- Rate di interazione  $\rightarrow$  probabilità di sopravvivenza  $\nu_e$  a diverse energie  $P(\nu_e \rightarrow \nu_e)$
- Test a **bassa E** che ad **alta E** e confronto con **predizione oscillazione  $\nu_e$  secondo MSW-LMA**
  - Bassa E: miglior precisione finora
  - Alta E: accordo con SK e SNO

osc. **nel vuoto**  
dominante

osc. **nella materia**  
dominante

In accordo con oscillazione con  
parametri MSW-LMA

# Conclusioni

## Spettroscopia di neutrini solari

- Misure di precisione: pep ( $5\sigma$ ),  ${}^7\text{Be}$ , pp, CNO (limite),  ${}^8\text{B}$ , hep
- Test del Modello Solare Standard
- Indicazione debole sulla metallicità solare

# Conclusioni

## Spettroscopia di neutrini solari

- Misure di precisione: pep ( $5\sigma$ ),  ${}^7\text{Be}$ , pp, CNO (limite),  ${}^8\text{B}$ , hep
- Test del Modello Solare Standard
- Indicazione debole sulla metallicità solare

## Altri risultati di Borexino:

- Geo-neutrini
- Variazioni stagionali
- Limite al momento magnetico del neutrino
- Limite a  $v$  da onde gravitazionali
- ...

# Conclusioni

## Spettroscopia di neutrini solari

- Misure di precisione: pep ( $5\sigma$ ),  ${}^7\text{Be}$ , pp, CNO (limite),  ${}^8\text{B}$ , hep
- Test del Modello Solare Standard
- Indicazione debole sulla metallicità solare

## Altri risultati di Borexino:

- Geo-neutrini
- Variazioni stagionali
- Limite al momento magnetico del neutrino
- Limite a  $v$  da onde gravitazionali
- ...

## Problemi aperti:

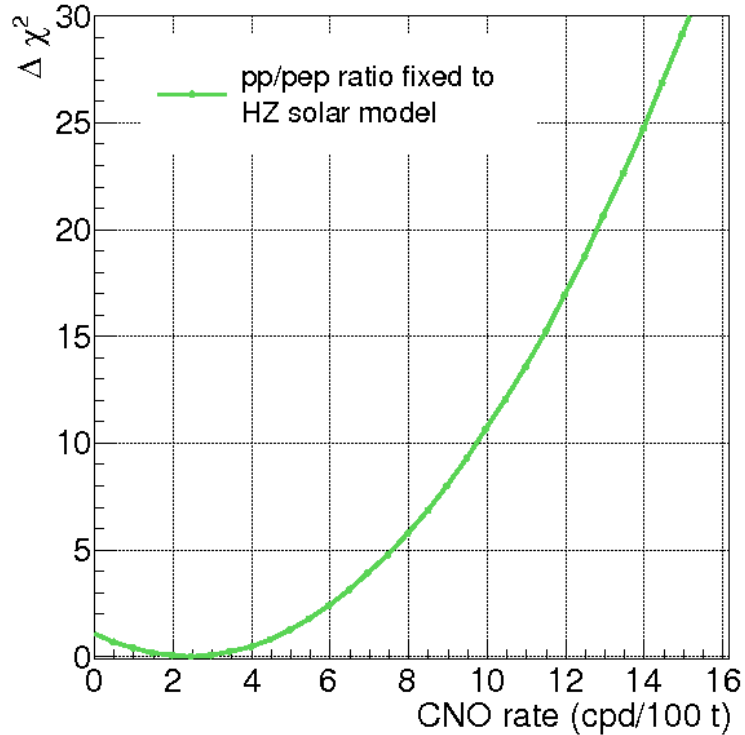
- Metallicità solare: alta o bassa?
- Misura di  $v$  da ciclo CNO?



Backup

# Risultati: CNO e pep

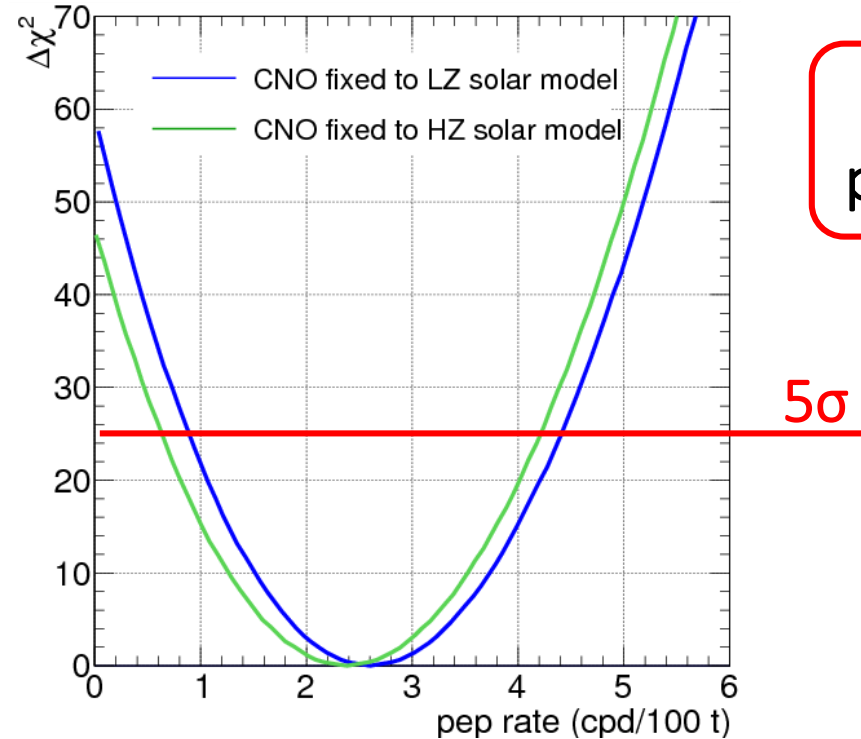
$\nu$  CNO  
profilo di  $\Delta\chi^2$



Limite superiore a  $\nu$  da ciclo CNO  
 $\text{rate}(\text{CNO}) < 9.1 \text{ cpd}/100 \text{ t} @ 95\% \text{ C.L.}$

Ipotesi HZ:  $\text{rate}(\text{CNO}) < 4.91 \pm 0.56 \text{ cpd}/100\text{t}$   
Ipotesi LZ:  $\text{rate}(\text{CNO}) < 3.62 \pm 0.37 \text{ cpd}/100\text{t}$

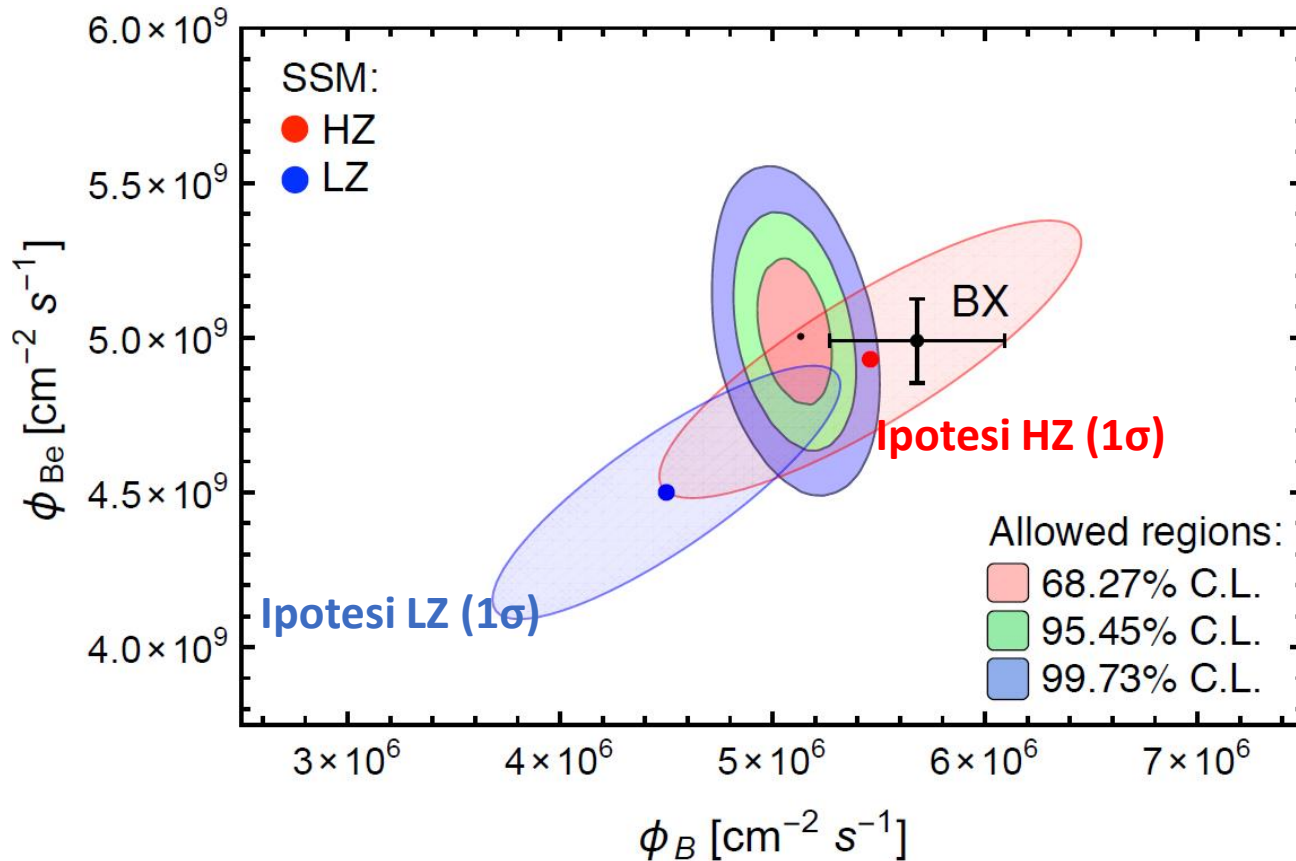
$\nu$  pep  
profilo di  $\Delta\chi^2$



Assenza di neutrini pep rigettata ad oltre  $5\sigma$

$\text{rate}(\text{pep}) = 2.43 \pm 0.36 \text{ (stat)} + 0.15 - 0.22 \text{ (sys)}$   
 $\text{cpd}/100 \text{ t}$

# Metallicità solare – Fit globale



- $\nu$  da  ${}^7\text{Be}$  e  ${}^8\text{B}$ : differenze del 9% e 18% a seconda dell'**alta** o **bassa** metallicità
- Fit globale: esperimenti su neutrini solari + KamLand